

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské technologie

**Výzkum vlivu recyklace Al prášku na výslednou
porozitu součásti**

**Research of the Influence of Recycling of Al Powder on
the Resulting Porosity of the Component**

Student:

Bc. Richard Byrtus

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Hajnyš, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Richard Byrtus**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Výzkum vlivu recyklace Al prášku na výslednou porozitu součásti**
Research of the Influence of Recycling of Al Powder on the Resulting Porosity of the Component
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Rešeršní část technologie SLM a problematiky přesnosti výroby.
3. Návrh experimentu a cíl práce.
4. Diskuze výsledků.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

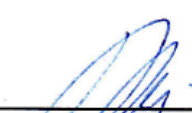
GU, H.; GONG, H.; DILIP, D; PAL, A; HICKS, H; STUCKER, B. *Effects of Powder Variation on the Microstructure and Tensile Strength of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting*. In: 25th annual international solid freeform fabrication symposium. 2014, s. 470-483.
LIU, B.; WILDMAN, R.; TUCK, C.; ASHCROFT I.; HAGUE, R. *Investigation the effect of particle size distribution on processing parameters optimisation in selective laser melting process*. In: Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium . Austin: University of Texas at Austin, 2011, s. 227-238
GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010, xxii, 459 p. ISBN 1441911200.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry

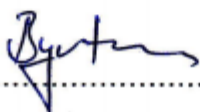



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.05.2020

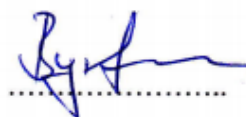
A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Bystran', written over a horizontal dotted line.

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.05.2020



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Richard Byrtus

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Písečná 204, Jablunkov 739 91

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BYRTUS, R. *Výzkum vlivu recyklace Al prášku na výslednou porozitu součásti: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské technologie, 2020, 70 stran, 28 obrázku, 13 tabulek. Vedoucí práce: Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.

Předkládaná diplomová práce se zabývá vlivem recyklace Al práškového kovu na výslednou porozitu součásti v oblasti aditivní výroby, konkrétně 3D tiskem kovů. Tato práce je rozdělena na dvě části. První, rešeršní část, uvádí přehled stávajícího poznání o aditivní výrobě, SLM tisku a vlivu vybraných procesních parametrů tisku na výslednou součást. Zabývá se problematikou výroby, zejména vznikem porozity, která je v mnoha ohledech příčinou zhoršení mechanických vlastností. Dále se teoretická část věnuje práškovým kovům, jejich výrobě a recyklaci. Experimentální část je rozdělena do tří kapitol. První kapitola obsahuje popis profesionálních zařízení, které byly v průběhu experimentu použity. Druhá část pokračuje výzkumem hliníkové slitiny AlSi10Mg, ve které jsou měřeny výsledky distribuce částic hliníkové slitiny v různých stádiích recyklace, která je jednou z možných příčin degradace vlastností práškových materiálů. Závěr experimentální části popisuje doporučené procesní parametry tisku a porovnává míru vlivu recyklace prášku na tvorbu porozity.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

BYRTUS, R. *Research of the Influence of Recycling of Al Powder on the Resulting Porosity of the Component: Diploma thesis*, Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020 70 pages, 28 figures, 13 tables. Thesis head: Ing. Jiří Hajnýš, Ph.D.

The presented diploma thesis deals with the influence of recycling of Al powder metal on the resulting porosity of the component in the field of additive production, specifically the 3D printing of metals. This work is divided into two parts. The first, research part, provides an overview of current knowledge about additive production, SLM printing and the influence of selected process parameters of printing. It also deals with the manufacturing problems, especially the formation of porosity, which in many aspects is the cause of deterioration of mechanical properties. Furthermore, the theoretical part deals with powdered metals, their production and recycling. The experimental part is divided into three chapters. The first chapter contains a description of professional equipment that was used during the experiment. The second part continues with the research of the aluminium alloy AlSi10Mg, in which the results of the distribution of aluminium alloy particles at different stages of recycling are measured, which is one of the possible causes of degradation of the properties of powder materials. The conclusion of the experimental part describes the recommended process parameters of printing and compares the degree of influence of powder recycling on the formation of porosity.

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod | 11 |
| 2 | Aditivní výroba..... | 12 |
| 2.1 | Rozdělení aditivní výroby..... | 14 |
| 2.1.1 | Tryskání pojiva (<i>Binder Jetting</i>) | 14 |
| 2.1.2 | Přímé ukládání energie (<i>Directed Energy Deposition</i>) | 15 |
| 2.1.3 | Vytlačování materiálu (<i>Material Extrusion</i>) | 15 |
| 2.1.4 | Tryskání materiálu (<i>Material Jetting</i>) | 16 |
| 2.1.5 | Fúze práškového lože (<i>Powder Bed Fusion</i>)..... | 16 |
| 2.1.6 | Laminace plechů (<i>Sheet Lamination</i>)..... | 17 |
| 2.1.7 | Fotopolymerizace (<i>Vat Photopolymerization</i>) | 18 |
| 3 | Metoda SLM..... | 19 |
| 3.1 | Výrobní kritéria..... | 20 |
| 3.2 | Problematika výroby | 21 |
| 3.2.1 | Porozita..... | 22 |
| 3.2.2 | Hustota..... | 23 |
| 3.2.3 | Deformace a zakřivení..... | 25 |
| 3.2.4 | Klíčová díрка | 25 |
| 3.3 | Postup tisku..... | 26 |
| 3.4 | Strategie skenování | 26 |
| 4 | Práškové kovy | 29 |
| 4.1 | Výroba práškových kovů | 29 |
| 4.1.1 | Atomizace plyny..... | 29 |
| 4.1.2 | Atomizace vody | 31 |
| 4.1.3 | Plazmová atomizace | 31 |
| 4.2 | Vlastnosti práškového kovu..... | 32 |
| 4.3 | Recyklace prášku | 32 |
| 4.3.1 | Vliv recyklace na vlastnosti prášku | 33 |
| 4.3.2 | Vliv recyklace na vlastnosti materiálu | 35 |
| 5 | Hliník a jeho slitiny | 36 |
| 6 | Experimentální část | 38 |

| | | |
|-----|--|----|
| 6.1 | Tiskárna TruPrint 1000 | 38 |
| 6.2 | Pyknometr AccuPyc II 1340 | 40 |
| 6.3 | Malvern Mastersizer 3000 | 42 |
| 6.4 | Testování pomocí metody DOE | 45 |
| 7 | Výzkum práškové slitiny AlSi10Mg | 46 |
| 7.1 | Morfologie kovového prášku | 48 |
| 7.2 | Měření distribuce velikosti částic | 51 |
| 7.3 | Závěr a diskuze | 52 |
| 8 | Výzkum porozity vytištěných součástí | 54 |
| 8.1 | Procesní parametry | 54 |
| 8.2 | Výsledky měření porozity součástí | 55 |
| 8.3 | Závěr a diskuze | 61 |
| 9 | Závěr | 62 |
| 10 | Seznam použité literatury | 64 |
| 11 | Seznam obrázků | 69 |
| 12 | Seznam tabulek | 70 |

Seznam použitého značení, symbolů a zkratek

| | |
|------|--|
| AM | Additive Manufacturing/ Aditivní výroba |
| APS | Average particle size/ Průměrná velikost částice |
| CAD | Computer Aided Design/ Počítačem podporované kreslení |
| CNC | Computer Numerical Control/ Počítačem řízený stroj |
| DOE | Design of experiments |
| EBM | Electron Beam Melting/ Elektronový paprsek |
| EIGA | Electrode induction melting gas atomization/ Atomizace roztaveného plynu indukční elektrodou |
| GA | Gas atomization/ Plynová atomizace |
| HRC | Tvrdost podle Brinnela |
| IN | Inconel |
| LCD | Liquid crystal display/ Displej z tekutých krystalů |
| PSD | Particle size distribution/ Distribuce velikosti částic |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| RM | Rapid Manufacturing/ Rychlá výroba |
| SEM | Scanning Electron Microscope/ Skenovací elektronová mikroskopie |
| SLM | Selective Laser Melting/ Selektivní laserové tavení |
| VED | Volumetric Energy Density/ Objemová hustota energie |
| VIGA | Vacuum Inert Gas Atomization/ Atomizace vakuového inertního plynu |

| Symbol | Popis | Jednotka |
|---------------|-----------------------------------|----------------------|
| D | Hustota vytištěné součásti | [%] |
| h | Rozteč skenování | [mm] |
| P | Výkon laseru | [W] |
| Puz | Uzavřená pórovitost | [%] |
| r | Pyknometrická hustota | [g/cm ³] |
| t | Tloušťka vrstvy | [mm] |
| v | Rychlost skenování | [mm/s] |
| V | Objem | [cm ³] |
| VED | Objemová hustota vyzářené energie | [J/mm ³] |
| q | Hustota 100 % materiálu | [g/cm ³] |

1 Úvod

Zájem o výrobu stále více tvarově složitějších výrobků ve vysoké kvalitě při zachování nízkých nákladů nutí technické společnosti k investicím do nových technologií výroby. Tyto investice spolu s téměř dvěma desítkami let vývoje spojování kovového prášku zapříčinily, že se technologie Selective Laser Melting (SLM) stala jednou z nejrychleji rozvíjejících se metod oblasti rapid manufacturing (RM). V podstatě jde o nekonvenční metodu spékání kovového prášku vrstvu po vrstvě (layer-by-layer).

Využitím této formy aditivní výroby se vytváří součásti s velmi komplexní geometrií, bez nutnosti je dále jakkoliv upravovat nežli finálním dokončením povrchu. Právě geometrická volnost a přizpůsobivost jsou nejvýznamnějšími, nikoliv však jedinými výhodami v porovnání s konvenčními způsoby výroby, jakými jsou např. frézování, soustružení či odlévání. Využití této technologie je především v leteckém, automobilovém a medicinském odvětví, kde je využívána pro výrobu lehkých struktur, implantátů, nástrojů pro tlakové lití či geometricky komplexních struktur.

Technologie SLM je dalším velice důležitým přínosem především v malosériové a prototypové výrobě, kde přináší zkrácení doby mezi koncepty a produkty a tím i citelné snížení nákladů. Faktem je, že SLM je prakticky bezodpadová výrobní technologie, poněvadž nevyužitý prášek je možno recyklovat, což v konečném důsledku přispívá k ekonomice procesu. Je nutno podotknout, že recyklace může mít vliv na výslednou kvalitu prášku při jeho dalším použití. Zkoumání kvality prášku a vlivu stavby po dokončení výroby je proto klíčové k využití tohoto potenciálu. Tato práce se zabývá výzkumem Al prášku, kdy jsou zkoumány jednotlivé stavy prášku (panenský stav, přesetý stav, nepřesetý stav a odpad, který zůstane na sítu prosévacího zařízení), dále je v práci proveden základní výzkum pórovitosti hliníkové slitiny při různých parametrech tisku.

2 Aditivní výroba

Základním principem technologie aditivní výroby (AM, Additive Manufacturing) je vymodelovaný 3D CAD model, který se používá přímo k výrobě trojrozměrného objektu na mikronové úrovni přidáním vrstvy na vrstvu materiálu a jejich sloučením dohromady.

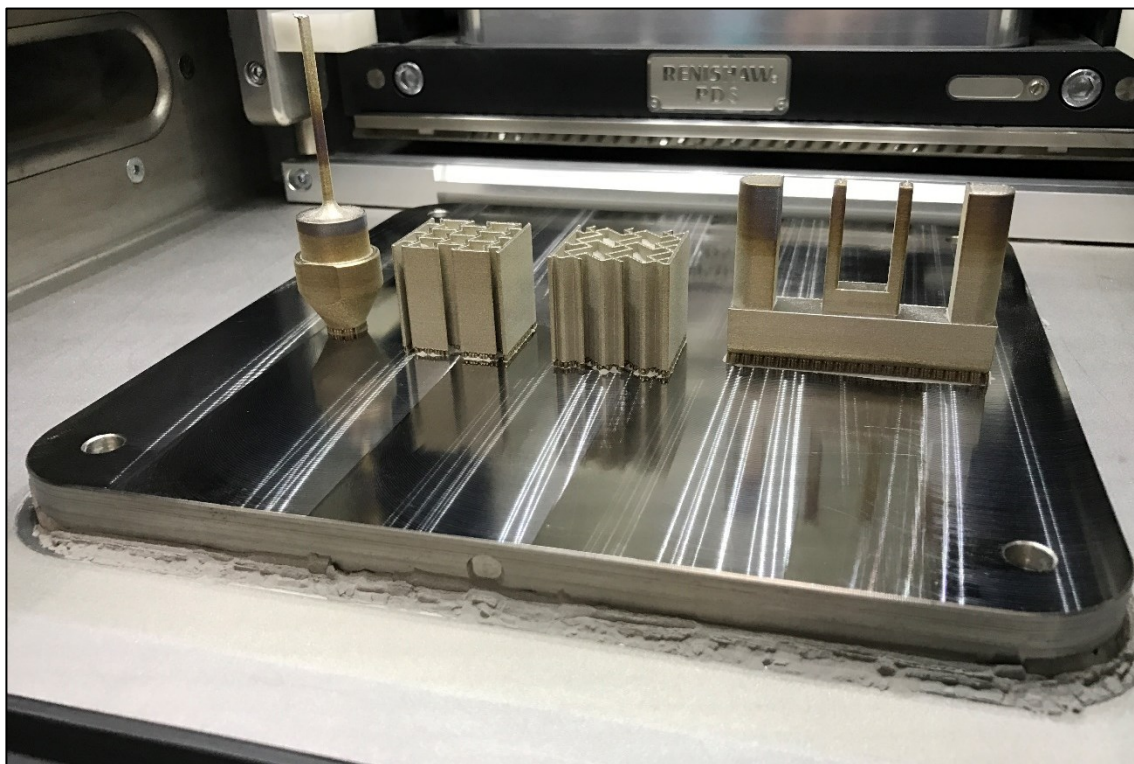
Existují různé přístupy k aditivní výrobě. Mezi nejvíce používané patří metoda selektivního tavení laserem nebo elektronovým paprskem, laserové plátování, tryskání pojivem a podobně. Důležitou součástí aditivní výroby kovových částí je výchozí materiál. Ten se nejčastěji vyskytuje v práškové formě.

V posledních letech byla aditivní výrobě věnována velká pozornost jak v populárním tisku, tak ve vědeckých časopisech. Aditivní výrobní technologie jsou v současné době jedním z nejrychleji se vyvíjejících výrobních procesů. Tyto technologie poskytují technikům inovativní přístup při navrhování a výrobě dílů. Usnadňují výrobu, jelikož podstatně snižují množství následného zpracování. Vysoká kvalita produktu je docílena tím, že konečný produkt se tvarově nejbližší podobá modelu zpracovanému počítačem. Procesy aditivní výroby mohou produkovat tvarově velmi složité a přizpůsobené díly bez potřeby specializovaného nástroje a mohou se vyrábět součásti přímo z informací o jejich konstrukci. Příkladem mohou být zubní náhrady, jakými jsou korunky či můstky, které se vyrábějí ve velkých počtech a vyžadují produkci vysoce komplexních, na míru přizpůsobených dílů. Dalším nesporným benefitem je aplikace této technologie v lékařské ortopedii, kdy jsou z titanu tištěny složité geometrické tvary a struktury. Aditivní výroba může být použita ke zkrácení doby výrobního cyklu a zvýšení produktivity při vstřikování plastů. Kovové nástroje používané pro vstřikování plastů obsahují kanály, které jsou nepostradatelné pro ochlazování odlitku před jeho vyjmutím z formy. U konvenčních metod výroby nástrojů se tyto chladicí kanály vrtají do nástroje v přímých liniích. S použitím aditivní výroby je možné tvarovat a postavit chladicí kanály tak, aby kopírovaly tvar výlisku. To přispívá ke zlepšení chladicího výkonu, prodloužení životnosti formy, snížení zmetkovitosti a zvýšení produktivity.

V automobilovém průmyslu se osvědčila aditivní výroba dílů na zakázku, například chladicích kanálů. Vývoj přispívá k vysokému podílu práce v tomto odvětví, spojený s vysokým podílem 3D tisku. Ten je podstatnou součástí výroby prototypů, vedoucích ke konkurenční výhodě. Funkční kovové části mohou být rychle vyrobeny a otestovány v provozu.

V leteckém průmyslu se součásti vyrobené pomocí AM používají pro funkční díly včetně lopatek turbín motoru, palivových systémů. Topologická optimalizace součástí může zlepšit funkčnost a snížit hmotnost. Lehčí části mohou přispět k odlehčení letadel a tím snížit spotřebu paliva.

Pro kreativní průmysly včetně architektury, výroby šperků a zábavního průmyslu, kde jsou vyžadovány vysoce složité a zakázkové předměty, tento proces znamená volnost návrhu. Na zakázku lze vyrobit flexibilní závěsy, vzájemně spojené díly, tenkostěnné či duté předměty. Kovy mohou být dokončeny pomocí řady procesů pro maximální vizuální efekt. [14]



Obrázek 1 Vytisknuté kovové součásti 3D tiskárnou Renishaw AM400 použitím metody SLM

[5]

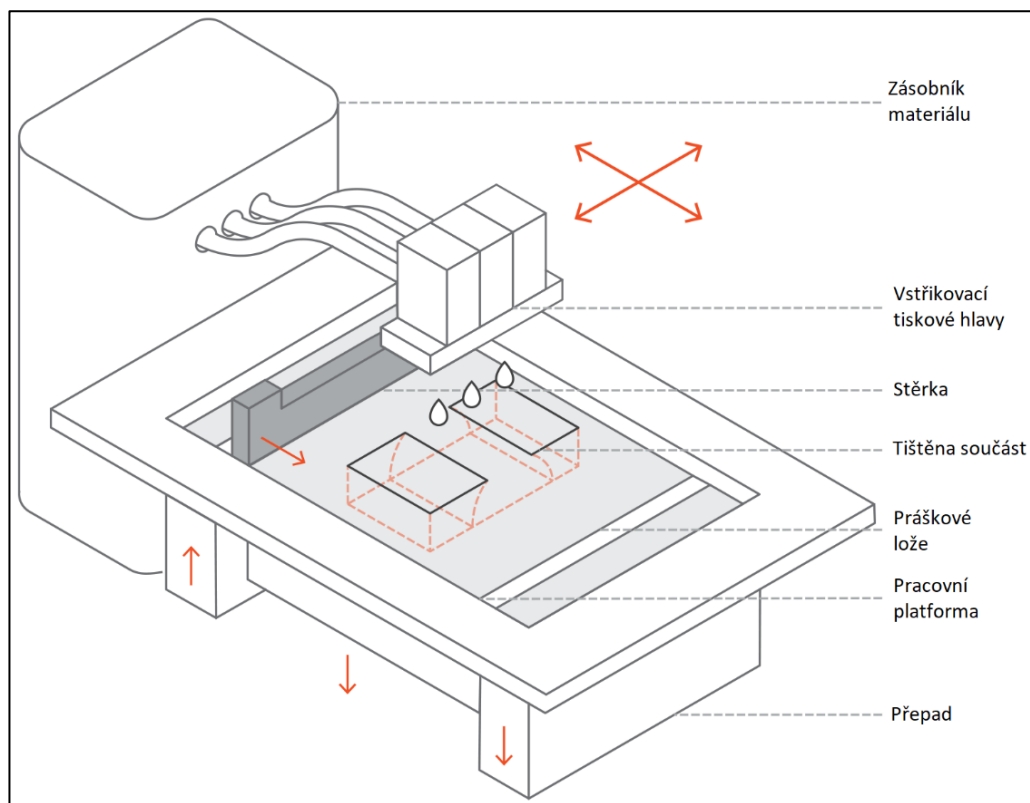
2.1 Rozdělení aditivní výroby

Během posledních let se trh pracujících s technologiemi aditivní výroby zvětšil natolik, že bylo nezbytné roztrždit a uspořádat jednotlivé technologie, čehož v roce 2004 dosáhla Společnost aditivních technologů (Society of Manufacturing Engineers). Této společnosti se povedlo všechny známe aditivní technologie uspořádat, nicméně už v roce 2012 do tohoto uspořádání přibýly další, jako jsou LENS, Prometal, PolyJet a Elektronový paprsek. Z výše uvedených informací je patrné, že se jedná o technologii s obrovským potenciálem. Možnosti, jakými lze metody aditivní výroby rozdělit, je celá řada, avšak nejzákladnějším rozdělením je použitá technologie a vstupní materiál. [11]

Norma ISO/ASTM 52900:2015 (Additive Manufacturing – General Principles – Terminology) vydaná v roce 2015 stanovuje a definuje pojmy používané v technologii aditivní výroby, která aplikuje princip aditivního tvarování a tím vytváří fyzické 3D geometrie postupným přidáváním materiálu. Rozděluje aditivní výrobu do sedmi výrobních procesů: [15]

2.1.1 Tryskání pojiva (*Binder Jetting*)

Technika tryskání pojivem spočívá v nanesení tekutého pojiva na tenké vrstvy práškového materiálu po celé pracovní platformě při pokojové teplotě. Běžně používané práškové materiály jsou buď na bázi keramiky, například sklo či sádra, nebo na bázi kovu, například nerezová ocel. Během procesu 3D tisku tryskáním pojiva se 3D tisková hlava pohybuje po pracovní platformě ukládající kapičky pojiva, přičemž každou vrstvu tiskne podobným způsobem jako 2D tiskárny, které tisknou inkoust na papír. Když je vrstva kompletní, práškové lože se posune dolů a nová vrstva prášku je rozprostřena na oblast sestavení. Proces se opakuje vrstvu po vrstvě, dokud nejsou všechny části kompletní. Po tisku jsou součásti v tzv. zeleném nebo nedokončeném stavu a vyžadují další dodatečné zpracování, než budou připraveny k použití. V závislosti na materiálu je obvykle vyžadován krok dodatečného zpracování. Například kovové části musí být slinovány, tepelně zpracovány nebo infiltrovány kovem s nízkou teplotou tání, což může být například bronz. Tím se dosáhne slinování zrn hmoty. V případě keramiky se jedná o kyanoakrylátové lepidlo. Plnobarevné prototypy jsou také infiltrovány akrylem a potažené, aby se zlepšila živost barev. Jádra a formy pro lití do písku jsou obvykle připraveny k použití po 3D tisku.



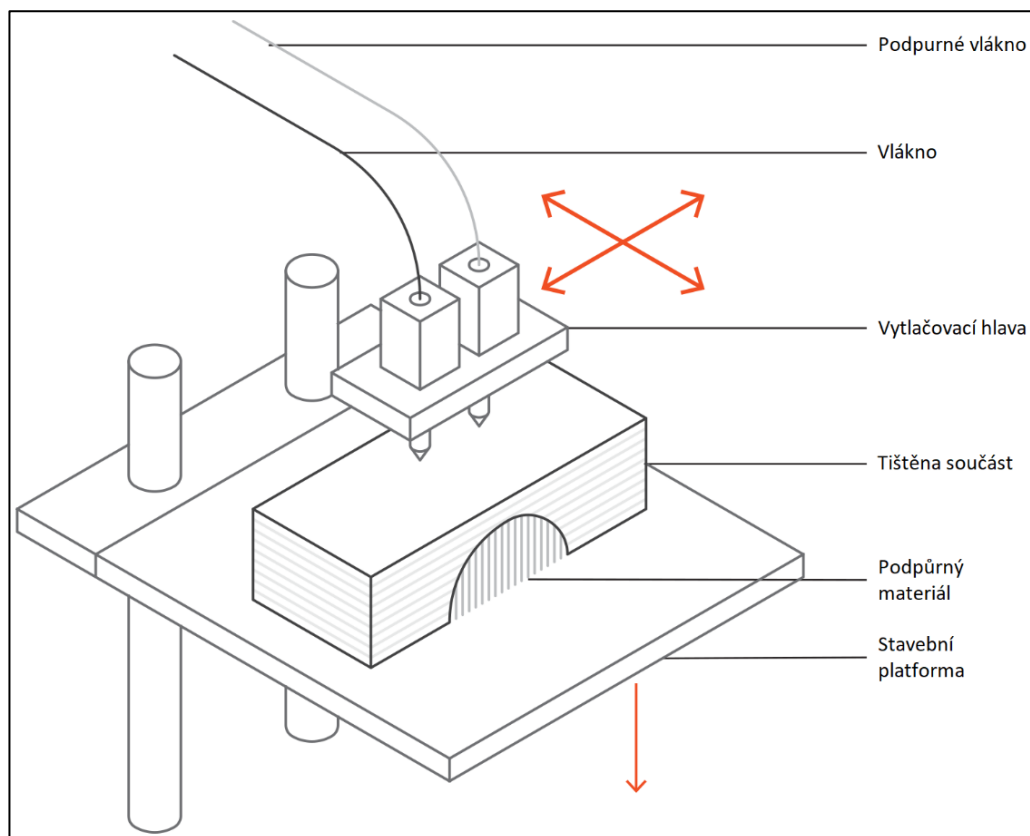
Obrázek 2 Schéma 3D tiskárny využívající metodu Tryskání pojiva [30]

2.1.2 Přímé ukládání energie (*Directed Energy Deposition*)

Tato technika funguje nanesením materiálu na základnu nebo součást, která je opravována pomocí trysky namontované na více směrném ramenu (obvykle čtyř nebo pěti směrném). Kovový materiál, který je přiváděn do trysky, je buď ve formě prášku nebo drátu. Při ukládání materiálu jej současně zdroj tepla taví, obvykle za použití laseru, elektronového paprsku nebo plazmového oblouku. Tento postup se provádí opakovaně, dokud vrstvy neztuhnou a nevytvoří nebo neopraví objekt. Takovýto proces se obvykle používá u kovů ve formě prášku nebo drátu. Je však možné použít také polymery, keramiku nebo další materiály. [28]

2.1.3 Vytlačování materiálu (*Material Extrusion*)

Cívka s materiálem v podobě vlákna se nejprve vloží do tiskárny. Jakmile tryska dosáhne požadované teploty, vlákno se přivádí do vytlačovací hlavy a do trysky, kde se taví. Vytlačovací hlava je připojena k trojosému systému, který jí umožňuje pohyb ve směru X, Y a Z. Roztavený materiál se nanáší v tenkých pramenech vrstvu po vrstvě na předem určená místa, kde se ochladí a ztuhne. Někdy je ochlazování materiálu urychlováno použitím chladicích ventilátorů připevněných k vytlačovací hlavě. K vyplnění oblasti je třeba více průchodů (podobné obarvení obdélníku značkou). Po dokončení vrstvy se stavební platforma posune dolů, v jiných nastaveních stroje se vytlačovací hlava posune nahoru a uloží se nová vrstva. Tento proces se opakuje, dokud není část dokončena. Použitým materiálem bývají nejčastěji polymery a plasty. [2]



Obrázek 3 Schéma tiskárny využívající metodu Vytlačování materiálu [31]

2.1.4 Tryskání materiálu (*Material Jetting*)

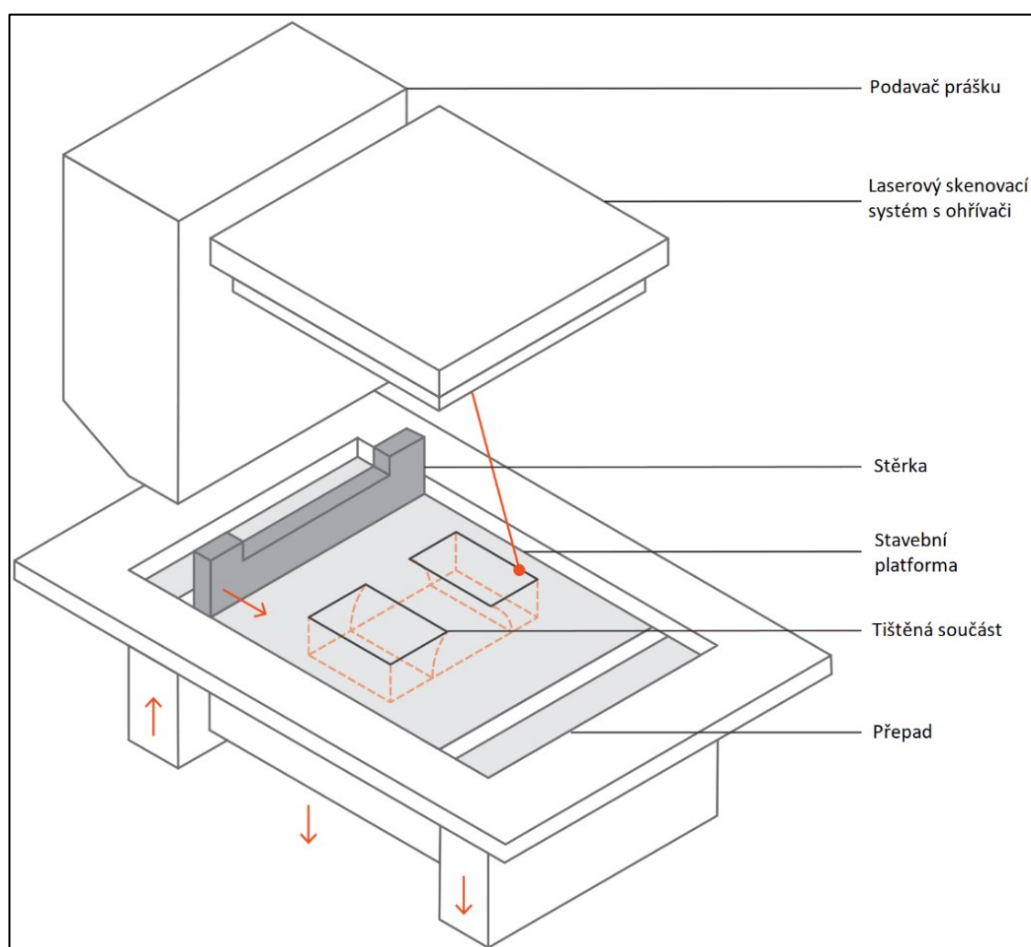
Tryskání materiálu je proces, který funguje podobně jako 2D tiskárny. Při tryskání materiálu tisková hlava, podobná tiskovým hlavám používaným pro standardní inkoustový tisk, vypouští kapičky fotocitlivého materiálu, který tuhne pod ultrafialovým světlem a vytváří část vrstvy po vrstvě. Používanými materiály jsou akrylové fotopolymery, které jsou dodávány v kapalně formě. Tento proces vytváří části s vysokou rozměrovou přesností a velmi hladkým povrchem. Široká škála materiálů, jakými jsou například pryže, plně průhledné materiály nebo vosk, jsou pro tento proces dostupné. Díky těmto vlastnostem je velmi atraktivní variantou jak pro vizuální prototypy, tak pro výrobu nástrojů. [31]

2.1.5 Fúze práškového lože (*Powder Bed Fusion*)

Pomocí zdroje tepla, zejména laserových nebo elektronových paprsků, dojde k roztavení práškových částic vrstvu po vrstvě, čímž se vytvoří pevná část. Využití této metody je ku příkladu v leteckém, obranném či zdravotnickém průmyslu, ale také motoristickém závodění či klenotnictví. Použitými materiály jsou titanové či hliníkové slitiny, kobalt-chromové slitiny, exotické materiály. [36]

2.1.6 Laminace plechů (*Sheet Lamination*)

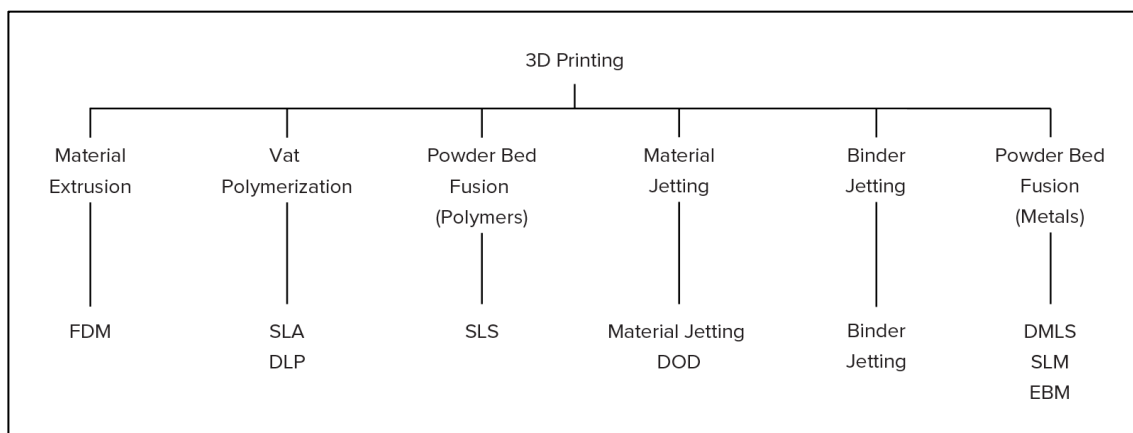
Laminace plechů spočívá v superpozici několika vrstev materiálu složeného z fólie, za účelem výroby předmětu. Každá fólie je řezána do tvaru nožem nebo laserem, aby se vešla na průřez objektu. Tiskárny Solido 3D, vyvinuté stejnojmennou izraelskou společností, jsou založeny na technologii vytvářející součásti vyrobené z kombinace PVC a patentovaného lepidla, což vede k výrobě robustních, přesto levných modelů. Později irská společnost Mcor Technologies Ltd vynalezla techniku laminování listů na bázi papíru. Nejnovější vývoj umožnil použití desek z uhlíkových vláken a různých kompozitů, jsou to zejména techniky zvládnuté společností EnvisionTEC a startupem Impossible Objects. Tyto techniky jsou jejich výrobci stále zdokonalovány a dosud nejsou široce rozšířeny. [37]



Obrázek 4 Schéma tiskárny využívající modelu Fúze práškového lože [31]

2.1.7 Fotopolymerizace (*Vat Photopolymerization*)

Fotopolymerizace zahrnuje několik různých procesů, které se spoléhají na stejnou základní strategii viz. Obrázek 5: tekutý fotopolymer obsažený v kádi nebo nádrži, je selektivně vytvrzován polymerací aktivovanou světlem. Vrstvou po vrstvě je 3D fyzický objekt vytvořen až do zhotovení. Existují různé typy vytvrzovacích zařízení, kromě nejstarší techniky, která je založena na laseru. Digitální projektory pro zpracování světla, a dokonce i LCD obrazovky, jsou nyní díky svým nízkým nákladům a velmi vysokému rozlišení oblíbenou možností fotopolymerizačních materiálů. Jednou z výhod těchto dvou technik, ve srovnání s lasery, je jejich schopnost současně vytvrdit celou vrstvu pryskyřice, zatímco laser musí postupně osvětlovat celý povrch jeho obkreslením. [35]



Obrázek 5 Rozdělení 3D tisku [30]

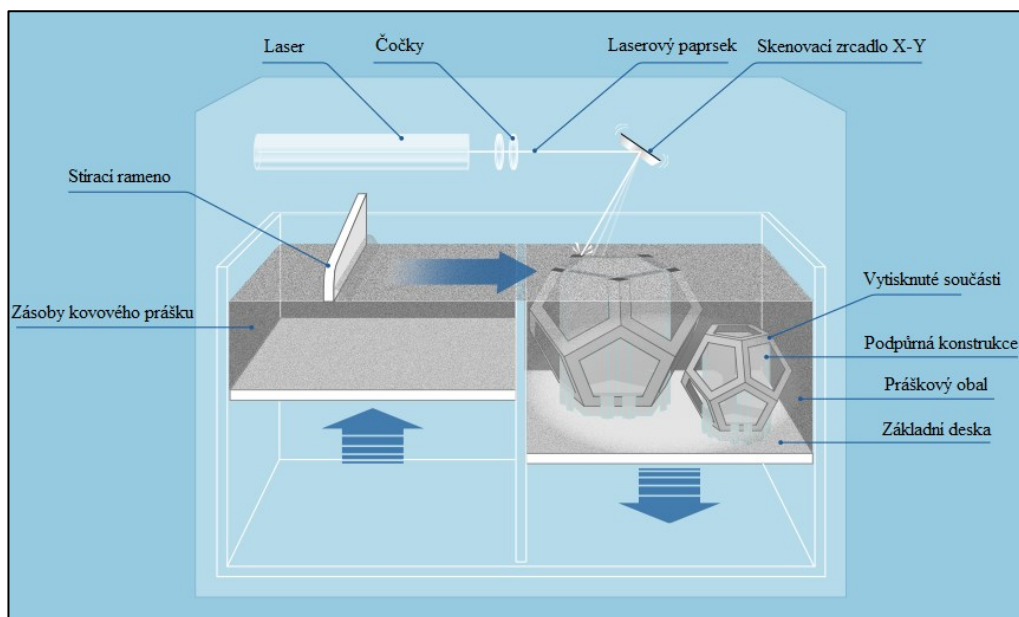
3 Metoda SLM

Metoda selektivního laserového tavení (SLM) je technologie rychlého prototypování, 3D tisku nebo aditivní výroby. SLM je proces aditivní výroby, který vyvinuli Dr. M. Fockele a Dr. D.Schwarze k výrobě kovových komponent z práškových kovů.

Selektivní laserové tavení neboli Selective Laser Melting, je populárním typem aditivní výroby vyvinutým v roce 1995 [5]. V současné době v průmyslu roste zájem o použití této technologie pro generování objektů s vysokou geometrickou složitostí. Metoda je určena k výrobě součástí po vrstvách z 3D CAD modelu. Součásti vznikají postupným natavováním tenkých vrstev práškového kovu. Jako zdroj tepla je použit vysoce výkonný laser (CO₂) případně elektronový paprsek, který rovnoměrně taví jednotlivé 2D vrstvy kovového prášku vrstvu po vrstvě na předem nahřáté pracovní desce neboli platformě, jejíž chemické složení je podobné práškovému kovu. Pro zavedení procesu SLM do průmyslu pro výrobu skutečných součástí musí být dosaženo vysokých mechanických vlastností finálního produktu. Vlastnosti vyráběných součástí silně závisí na každé jednotlivé dráze roztavené laserem a na každé jednotlivé vrstvě.

Bylo prokázáno, že touto technikou jsou vyrobeny téměř čisté části až do relativní hustoty 99,9 %. To umožňuje procesu budování funkčních částí s plnou hustotou. Benefitem je také ekonomická stránka metody. Vývoj vláknové optiky a vysoce výkonného laseru umožnil SLM pracovat s různými kovovými materiály, jako je měď, hliník a wolfram. Otevřely se tím výzkumné příležitosti v oblasti SLM keramických a kompozitních materiálů. [33,32]

Materiály, které jsou k dispozici pro 3D tisk, prošly dlouhou cestu od prvních dnů vzniku technologie. Nyní existuje celá řada různých typů materiálů, které jsou dodávány v různých stavech (prášek, vlákno, pelety, granule, pryskyřice atd.). Specifické materiály jsou nyní obecně vyvíjeny pro specifické platformy, provádějící specializované aplikace (příkladem by mohl být zubní sektor) s vlastnostmi materiálu, které přesněji vyhovují dané aplikaci. [29]



Obrázek 6 Princip metody SLM [5]

3.1 Výrobní kritéria

Výroba částí probíhá za přísně stanovených podmínek. Samotné tavení prášku se uskutečňuje v hermeticky uzavřené pracovní komoře bez přítomnosti vzduchu a vlhkosti, čehož je dosaženo použitím inertního plynu, např. argonu nebo dusíku. Vysoce účinný argon je výhodnější volbou, jelikož má vyšší protonové číslo a je těžší než dusík. Zásadou větší váhy argonu dochází k nahrazení zbytkového vzduchu s koncentrací kyslíku pod 0,1 %. Při použití jiných reaktivních materiálů, jakým je např. titan, klesá koncentrace kyslíku dokonce pod hranici 0,01 %. Proudění plynu v pracovní komoře tiskárny AM 400 je zajištěno z levé i pravé strany. Tavení kovových částic umožňuje laserový paprsek. U metody SLM se výkon laseru pohybuje v rozmezí od 100 do 1000 W. Průměr laserového paprsku může být 40–100 mikrometrů. Tloušťka vrstvy se v závislosti na použitém materiálu pohybuje v rozmezí 20 až 100 mikrometrů. [34]

Existují parametry, které lze před spuštěním samotné výroby nastavit ve výrobním softwaru. Tyto parametry poté ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti výrobku, čas výroby nebo kvalitu povrchu. Mezi hlavní parametry patří:

- Umístění/orientace součástí
- Tloušťka vrstvy
- Výkon laseru
- Rychlost skenování
- Strategie šrafování
- Průměr laserového paprsku



Obrázek 7 Schéma pracovní komory 3D tiskárny Renishaw AM [5]

3.2 Problematika výroby

Výhod, které aditivní technologie SLM poskytuje je celá řada. Nicméně najdou se i různé nevýhody a úskalí, které jsou s tímto procesem spjaty, ať už je to z důvodu přísně stanovených výrobních podmínek tohoto specifického procesu, nedostačujících vědomostí či technologických limitů. Mezi nežádoucí jevy patří porozita, hustota, deformace a zakřivení (warping/curling), klíčová dírka, denudace prášku, tvorba strusky (dross formation), vznik vnitřního pnutí a tvarové deformace, zapříčiněné výraznými teplotními gradienty během procesů. Mnoho odborných publikací a výzkumů [38, 23], které se za poslední léta vznikly, se snaží eliminovat tyto obtíže u různých druhů materiálů. Hlavním cílem těchto vědeckých článků je získat co možná nejpresnější parametry optimalizované pro konkrétní materiál při daných podmínkách a zdokonalit tak novou progresivní technologii k vytvoření součástí s optimální kvalitou.

3.2.1 Porozita

3D tištěné kovové části jsou často sužovány vysokou porézností, ke které dochází během procesu tisku, protože uvnitř dílu se vytvářejí malé díry a dutiny. Tyto malé, obvykle mikroskopické póry mohou způsobit nízkou hustotu. Čím větší je obsah pórů, tím nižší je hustota součásti. Mohou přímo ovlivnit mechanické vlastnosti součásti, čímž se stávají náchylnější k prasklinám nebo jinému poškození, zejména při vystavení vysokému zatížení.

Porozita je jeden z nejčastějších nežádoucích jevů, který může mít více spouštěcích mechanismů. Obvykle existují dva hlavní důvody pro vysoce porézní 3D tištěné kovové části. Možnou variantou je technologie výroby prášku, nebo samotný proces 3D tisku. Například použití atomizace plynu může způsobit vytvoření pórů v práškovém materiálu. Častějším zdrojem takových malých děr je samotný tiskový proces, kdy nedostatečná energetická hustota (parametr výkonu laseru), může vést k nenatavení povrchu předcházející vrstvy a tím zabrání vzniku koherentní vazby mezi sousedními vrstvami. V některých případech nastává opak a laserová energie tak způsobuje rozstříknutí kapiček roztaveného materiálu, což způsobuje póry.

Další příčinou může být rychlost skenování, rozestupy šraf a tloušťka vrstvy. Tyto spouštěcí mechanismy ovlivňují velikost a výskyt pórů během výroby. Tzv. fúzní pórovitost je způsobena vlivem nedostatečného natavení a je charakteristická svou nepravidelností tvarů protažených podél roviny X a Y a častým výskytem podél hranic vrstev.

Naopak, existuje řada způsobů, jak odstranit poréznost 3D tištěných kovových dílů a dosáhnout silnějších a odolnějších dílů [38]:

- Kvalita materiálu může být zdrojem vysoké porozity, je proto potřeba se ujistit o důvěryhodnosti dodavatele a kvalitě jeho materiálu.
- Porozita způsobená během procesu tisku může být odstraněna vyladěním parametrů samotné tiskárny.
- Správné hustoty lze dosáhnout metodami následného zpracování, jako je izostatické lisování. To eliminuje jakékoli možné dutiny a současně zlepšuje mechanické vlastnosti 3D potištěné kovové součásti.
- Pro části s fúzním práškem je další možností následného zpracování infiltrace. Tato metoda se používá k vyplnění zbývajících dutin v kovové části. [38]

Tabulka 1 Porovnání hustot a hustoty laserové energie ve slitinách AlSi10Mg / Al-Si zpracovaných pomocí různých parametrů a skenovacích strategií. [13]

| Studie | Objemová hustota vyzářené energie VED [J/mm ³] | Hustota [%] |
|-----------------------|--|--------------------|
| Wang et al. [46] | 131 | 99,75 ^b |
| Aboulkhair et al. [1] | 100 ^a | 99,82 |
| Cai et al. [47] | 93,33 | 99,31 ^b |
| Olakanmi [48] | 60–75 | – |
| Read et al. [49] | 60 | – |
| Tradowsky et al. [50] | 58,37 ^a | 98,3 ^b |
| Larrosa et al. [51] | 58,37 ^a | 98,0 ^b |
| Thijs et al. [52] | 45 ^a | 99,4 |

Kde *a* označuje vyzářenou objemovou hustotu energie na základě osvědčených parametrů a písmeno *b* znamená hustotu zjištěnou z minimální porozity.

Výpočet vyzářené objemové hustoty energie se vypočítá podle vzorce (1):

$$VED = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} [J \cdot mm^{-3}] \quad (1)$$

Kde *P*, *v*, *h* a *t* jsou výkon laseru [W], rychlost skenování [mm/s], rozteč skenování [mm] a tloušťka vrstvy [mm]. [26,1,9]

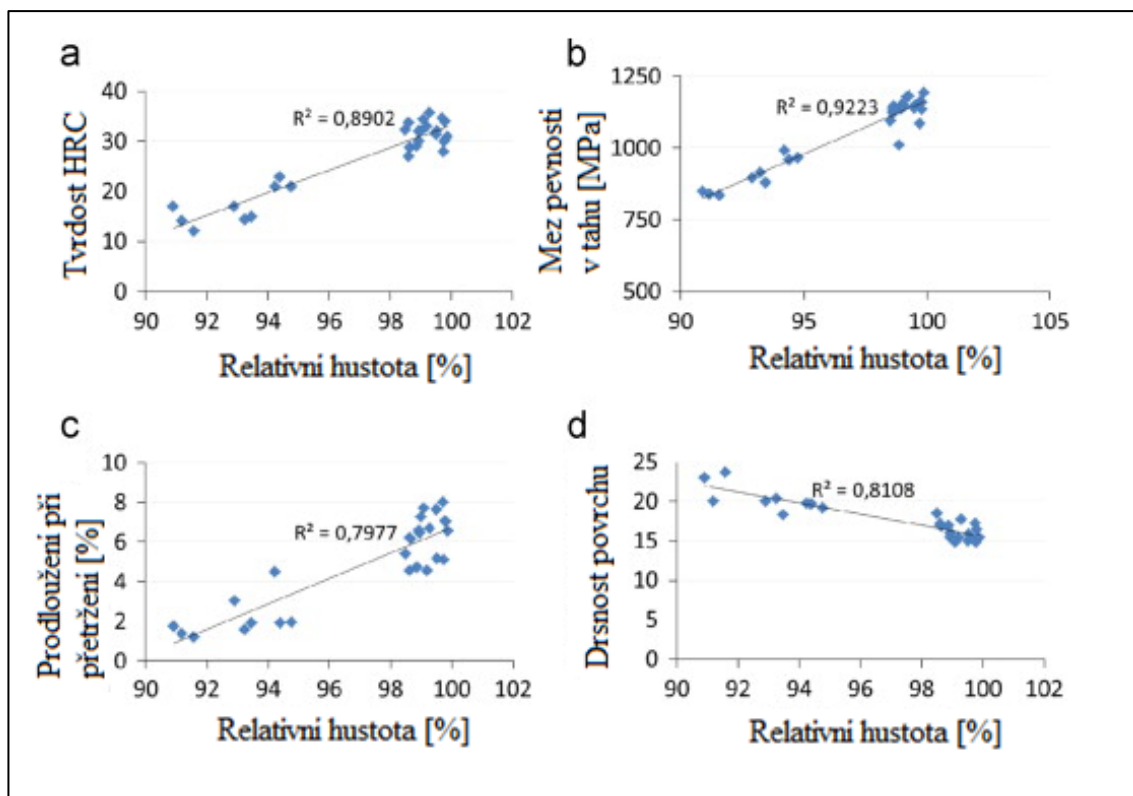
3.2.2 Hustota

Průmyslové aplikace kovových tištěných součástí často vyžadují vysoké mechanické vlastnosti, pro které je hustota součásti nesmírně důležitá. Když součást pracuje v podmínkách cyklického namáhání, její hustota určí, zda součást selže při zatížení. Jinými slovy, čím nižší je hustota součásti, tím je pravděpodobnější, že dojde k prasknutí pod tlakem. Technologie s práškovým ložem (SLM, EBM) mohou vyrábět součásti s hustotou 99 % a vyšší, které jsou zásadní pro stresové aplikace.

Toto tvrzení rovněž potvrzuje článek, ve kterém autoři G. Casalino a spol. zkoumali relativní hustotu na základě nastavení výkonu laseru a rychlosti skenování. Cílem jejich práce bylo provedení experimentálního výzkumu a následné statistické optimalizace parametrů selektivního procesu laserového tavení vysokopevnostní oceli 18Ni300.

Experimentální výzkum zahrnoval studium mikrostruktury, mechanických a povrchových vlastností práškového kovu. Výsledky experimentální studie ukázaly, že tvrdost, mechanická pevnost a drsnost povrchu pozitivně korelovaly s hustotou dílů. [6]

Studie ukázala, že v závislosti na nastavení výkonu laseru a skenovací rychlosti lze získat relativní hustotu dílu v rozmezí od 90,9 % do 99,9 %. Díly s relativní hustotou vyšší než 99 % měly velmi nízkou porozitu, která vykazovala uzavřené a pravidelně tvarované póry. Statistická optimalizace stanovila, že nejlepší vlastnosti součásti byly získány s výkonem laseru větším než 90 W a rychlostí menší než 220 mm/s.



Obrázek 8 Výsledky mechanických testů, vlastnosti a drsnosti povrchů v závislosti na relativní hustotě [6]

Pro zajištění konzistentní kvality a hustoty součásti je nutné optimalizovat specifické parametry materiálu, jako je velikost částic, tvar, distribuce a tekutost. Sférické neboli kulovité částice zlepšují tekutost prášku a hustotu, protože mohou dosáhnout maximální relativní hustoty ve srovnání s jinými tvary. Širší distribuce velikosti částic navíc umožňuje, aby jemné částice vyplňovaly mezery mezi většími částicemi, což vede k vyšší hustotě. Rizikem je snížení tekutosti prášku.

Tekutost je nezbytná k zajištění rovnoměrné vrstvy naneseného prášku, která ovlivňuje jak pórovitost, tak hustotu 3D tištěné součásti. Čím hustší bude daná vrstva, tím bude konečný předmět hustší a méně porézní.

Dle profesora na katedře strojního inženýrství a ředitele společnosti NextManufacturing Center na Carnegie Mellon University Jacka Beutha: „*Je maximální hustota (která se promítá do minimální porozity) důležitá, protože výrobci postupují směrem k výrobě dílů, které budou ve svých aplikacích vystaveny cyklickému (únavovému) zatížení*“ dále dodal, že: „*Ve výzkumu prováděném v našem NextManufacturing Center jsme prokázali, že poréznost z různých zdrojů lze ovládat a efektivně eliminovat manipulací s procesními proměnnými AM. Neexistuje žádný proces, který by se obzvláště lépe vyhnul porozitě než ostatní, ale pro každý proces existují kombinace procesních proměnných (definujeme je jako „okno zpracování“), které tak činí.*“ [23]

Protože však existuje celá řada proměnných (výkon laseru, použitá skenovací strategie, rychlost skenovací strategie atd.), které mohou ovlivnit hustotu součásti, je obecným pravidlem nejprve zvážit kvalitu kovového prášku a odpovídajícím způsobem upravit parametry procesu. [23,38]

3.2.3 Deformace a zakřivení

Aby se zajistilo správné spuštění tiskové úlohy, jsou počáteční vrstvy tisku spojeny se substrátem, který musí být po dokončení tisku odstraněn pomocí CNC obrábění. Pokud tepelné namáhání substrátu přesáhne pevnost materiálu substrátu, substrát se začne deformovat, což nakonec způsobí deformaci samotné součásti a potenciálně způsobí sražení stavěné součásti s kovovou lištou, která kovový prášek rovnoměrně nanáší na pracovní desku.

Aby se předešlo deformacím, je nutné umístit ideální počet podpůrných struktur na správná místa. Určení tohoto může být obtížné bez provedení pokusů s každou novou geometrií, která se vytiskne. Ve vývoji jsou softwarová řešení, například software ve stylu náhledu tisku vytvořený programem 3DSIM.

Software Inspector společnosti Materialise lze použít k provádění operací kontroly kvality v kovovém 3D tisku vytvářením procesních znalostí spojených se strojem. Software pracovává hromady obrazů sestavení, aby se zvýšila procesní znalost uživatele a označily se oblasti, které by mohly být deformovány. Provedením analýzy kořenových příčin a kontroly vektorů je uživatel schopen ověřit chybění podpůrných struktur způsobujících deformaci. Pochopení procesu sestavení je zásadní pro dosažení příští úspěšné výstavby kovu. [23]

3.2.4 Klíčová dírka

Gonga a kol., zkoumající kvalitu dílu na základě různých hustot energie prokázali, že pokud je hustota energie velmi vysoká, teplota uvnitř tavné lázně překročí bod varu vedoucí k odpařování materiálu. Odpařování materiálu zapříčiní odpařovací tlak a hluboké prohloubení vytvořené v tavné lázni je známé jako klíčová dírka. Když se hustota energie sníží, není pozorována tvorba klíčové dírky a režim tání se nazývá vodivé tání. Pokud se hustota energie dále snižuje, dojde k částečnému tání, které vede ke kuličkovému chování. Kuličkové chování

je typická vada metody SLM, která je škodlivá pro kvalitu tváření a nestabilitu během spojování práškové vrstvy. [12,17,26]

3.3 Postup tisku

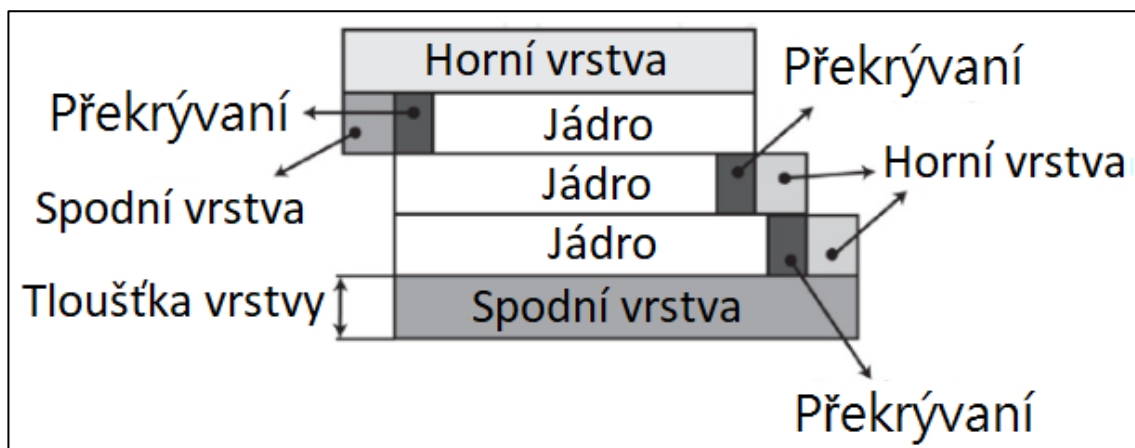
Proces SLM sestává z řady kroků od přípravy modelu v programu CAD až k odstranění zhotovené součásti ze stavební platformy. Postup skenování začíná vytvořením 3D modelu v programu CAD. Před nahráním dat z CAD do stroje SLM musí být soubory zpracovány speciálním softwarem, který rozdělí model do několika vrstev. Tloušťka jedné vrstvy je daná druhem materiálu a velikostí částic v prášku, pohybuje se v rozmezí od 20 do 150 mikrometrů. Sestavování komponenty začíná položením tenké vrstvy práškového kovu na pracovní platformu v pracovní komoře. Poté, co je nanесena vrstva prášku, je použit vysoce výkonný laser k roztavení vybraných oblastí podle zpracovaných dat. Ke zvýšení efektivity může být platforma před nanесením prášku přehřívána na teplotu blízkou bodu tání použitého materiálu. Jakmile je tavení dokončeno, stavební platforma se sníží o další vrstvu. Proces se dále opakuje pro následné vrstvy, dokud není vytvořena celá požadovaná komponenta.

Výrobní parametry, jako je výkon laseru, rychlost skenování, rozestup šrafů a tloušťka vrstvy jsou upraveny tak, aby jediný vektor taveniny mohl zcela fúzovat se sousedními vektory taveniny a s předchozí vrstvou. Jakmile je proces dokončen, z pracovní komory je odstraněn zbylý prášek a hotová komponenta může být odejmuta ze stavební platformy. Celý proces, kromě přípravy dat a odejmutí hotové součásti, je zcela automatizovaný. [16, 33, 34]

3.4 Strategie skenování

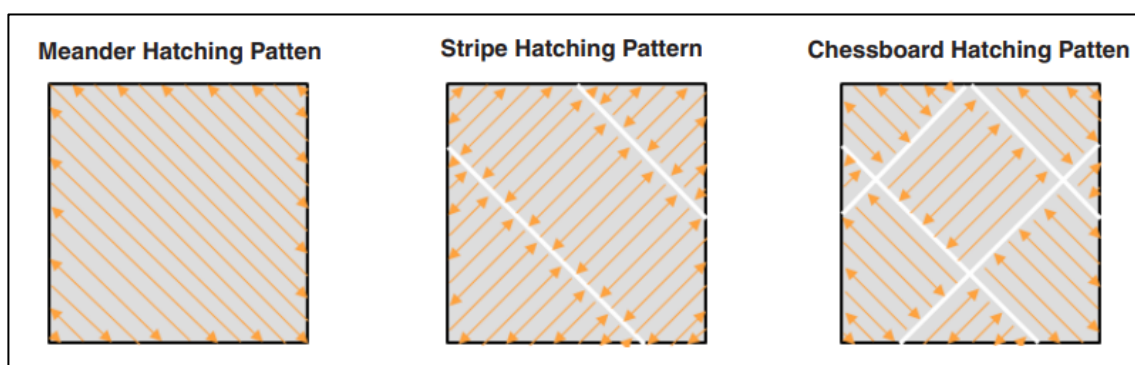
Selektivní tavení laserem ovlivňuje skenovací vzory, které určují dráhu laserového paprsku při jednotlivých vrstvách. Výběrem nejvhodnější strategie skenování pro danou geometrii součásti lze ovlivnit kritické vlastnosti, jako je pórovitost, mikrostruktura, drsnost povrchu a nárůst tepla v hotových kovových součástech a tím snížit zbytkové napětí, které vzniká při výrobě. Rychlý ohřev a následné ochlazení natavených částic je důvodem vzniku těchto napětí. Pestrá škála skenovacích strategií je zdokumentovaná v různých literaturách a komerční softwary již nabízejí modifikace těchto strategií pro využití plného potenciálu ve výrobních strojích SLM. [39]

Během celého pracovního procesu SLM jsou komponenty digitalizovány a krájeny na množství vrstev. Každá vrstva je dále rozdělena do různých oblastí na základě algoritmů. Stručně řečeno, tyto algoritmy definují každou oblast jako jádro, horní vrstvu a spodní vrstvu.



Obrázek 9 Horní vrstva, spodní vrstva a jádrové oblasti [18]

Definování těchto oblastí ve vrstvě umožňuje flexibilní přiřazení různých parametrů. Proces tavení a přenos tepla se podstatně liší v závislosti na materiálu a jeho umístění. Stejně tak jako výsledné vlastnosti hotového výrobku (mikrostruktura, drsnost povrchu atd.).



Obrázek 10 Nejčastěji používané strategie skenování práškového materiálu [39]

Skenovací strategie Meander je vhodná pro tenkostěnné součásti menších rozměrů, ve kterých jsou skenovací vektory umístěny blíže u sebe. Skenování probíhá jedním kontinuálním směrem. Výhodou této strategie je především vyšší rychlost tavení, kdy po každé zhotovené vrstvě nastane změna rotace skenování o 67° . Naopak nevýhodou je zvýšení zbytkového napětí.

Způsob strategie Stripe je podobný jako Meander. Rozdíl tvoří dráha laseru, která je přerušována pásy skenujícími se po sobě. Zkrácením skenovacích vektorů se příznivě sníží koncentrace zbytkového napětí. Mezi hlavní výhody patří homogenní rozložení zbytkových napětí a vyšší stavební rychlost, než u metody šachovnice.

Strategie Chessboard, kterou je také možno přeložit jako šachovnicová strategie, pracuje na principu rozdělení dráhy laseru do jednotlivých polí (jako na šachovnici), všeobecně o rozměrech 5x5 mm. Rozdělením do jednotlivých polí je docíleno snížení zbytkových napětí. Nicméně je nutné mít správně nastavenou rozteč mezi jednotlivými poli za účelem snížení vzniku porozity. Můžeme také otáčet orientaci skenovacích vektorů z jedné vrstvy do další, takže napětí nejsou všechna zarovnána ve stejné rovině. Mezi jednotlivými vrstvami se obvykle používá rotace o 67 stupňů, aby se co možná nejvíce minimalizovalo opakování směru skenování. Tato metoda je vhodná pro rozměrnější součásti. [39]

4 Práškové kovy

Práškové kovy se používají jako suroviny v procesu selektivního tavení laserem (SLM). Tento materiál je obvykle dostupný od více než jednoho dodavatele. Díky různým technikám a specifikacím používaným při výrobě prášku mohou mít různé šarže prášku odlišné vlastnosti. I když mají stejné nominální chemické složení, prášky vyrobené různými společnostmi se obvykle liší velikostí částic a morfologií. Rozdíly ve vlastnostech prášku vedou k různým termofyzikálním vlastnostem práškového lože, které ovlivňují tavení a tuhnutí prášku.

4.1 Výroba práškových kovů

Existují různé technologie pro hromadnou výrobu práškových kovů. Jedním z hlavních požadavků pro použití práškového kovu při aditivní výrobě a získávání realizovatelných a opakovatelných výsledků je kulová forma částic. Některé technologie umožňují vytvořit sférický nebo téměř kulovitý tvar prášku bezprostředně po syntéze prášku, zatímco jiné technologie vyžadují další zpracování k dosažení požadovaného tvaru částic.

Dostupná je celá řada metod syntézy kovových prášků. Fyzikálně-chemické metody jsou spojeny s fyzikálními a chemickými transformacemi a chemické složení a struktura konečného produktu se výrazně liší od surovin. Mechanické způsoby zahrnují různé typy frézovacích postupů. Tryskové disperze se taví za vysokého tlaku plynu nebo kapaliny, také známého jako atomizace.

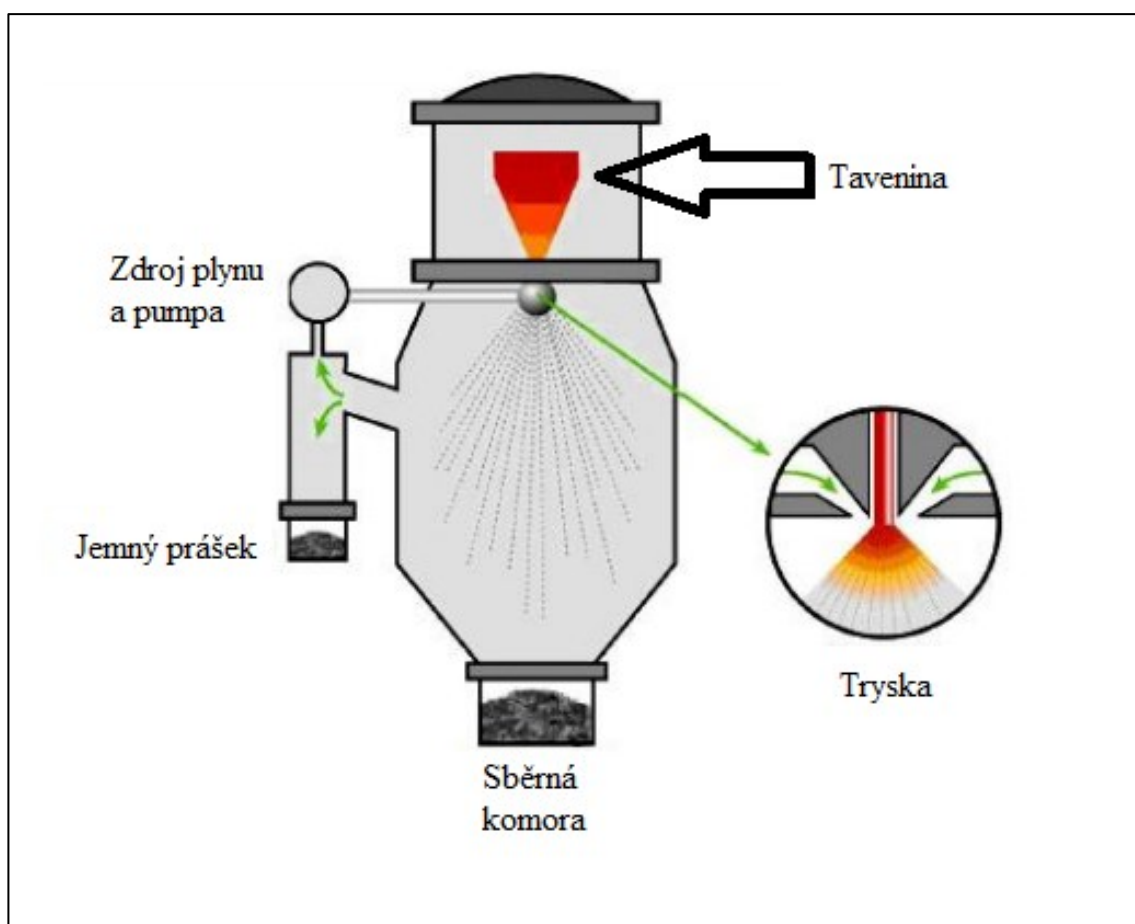
Atomizace je nejrozšířenější technologií pro hromadnou výrobu práškových kovů pro aditivní výrobu. Nejoblíbenější je proces atomizace pomocí plynů, podobný technologii atomizace vody, další je plazmová atomizace, známá také jako atomizace rotační elektrodou. Hlavním principem všech atomizačních technologií je odbourávání tenkého pruhu roztaveného kovu. Ten je vystaven nárazu plynu, vysokému tlaku vody, plazmy, rotujícím silám atd. Během nárazu je roztavený kov rozdělen na malé kapičky, které se za letu rychle krystalizují, než dosáhnou stěn atomizéru.

4.1.1 Atomizace plyny

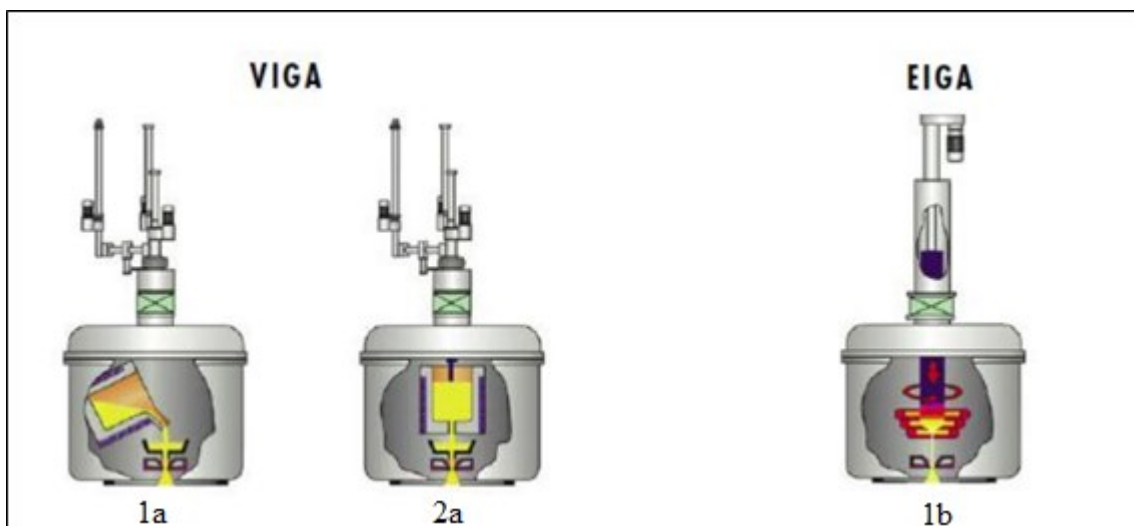
Atomizace plyny je běžný a dobře zavedený způsob výroby požadovaných sférických částic. Prášky získané procesem atomizace plyny mají obvykle kulovitý nebo téměř kulovitý tvar a velikosti částic, které lze vhodně použít v aditivních technologiích. Je třeba poznamenat, že distribuce velikosti částic má silnou závislost na typu atomizované slitiny a použitém systému. Postup procesu ve výrobě práškového kovu je roztavení, atomizace a ztuhnutí příslušných kovů a slitin. Surový materiál je umístěn do horní komory pece, kde je materiál roztaven. Roztavený kov poté vstupuje do komory níže, buď mezipánví nebo přímo, kde je tenký proud roztavené slitiny rozptýlen v malých kapičkách pod vysokým tlakem inertního plynu. [24,27]

Kovové kapičky ztuhnou během letu v rozprašovací komoře a shromažďují se ve spodní komoře (viz. obrázek 11). Prášky vyráběné atomizací plynu mají díky rychlému tuhnutí kulovitý tvar, vysokou čistotu a jemnou homogenní mikrostrukturu. Kvůli vysokým požadavkům na čistotu prášku v kosmickém prostoru se tavení obvykle provádí pomocí vakuových indukčních nebo elektrodových tavicích pecí (viz. obrázek 12).

Vakuový inertní plyn atomizace (VIGA) produkuje rafinované a odplyněné taveniny, kde tavenina proudí mezipánvní tryskou do atomizační komory. Metoda atomizace roztaveného plynu indukční elektrodou (EIGA) používá suroviny ve formě tyčí. Tyč je napájena, rotována a roztavena indukční cívkou. Tavenina přímo vstupuje do atomizační komory bez použití mezipánve. Tento proces nezajišťuje žádný kontakt s tavicím kelímkem, čímž se minimalizuje riziko kontaminace reaktivními slitinami. To má za následek vytvoření kulových tvarů se širokou distribucí velikosti částic 0-500 μm . Tento PSD může být v užším rozsahu řízením toku plynu. Produkce prášku pomocí plynové atomizace obvykle generuje tzv. malé satelity. Satelity jsou povrchové nepravidelnosti sestávající z menších částic ulpívajících na povrchu větších. [53]



Obrázek 11 Základní ilustrace procesu atomizace plynu [53]



Obrázek 12 Ukázka naklápěcího kelímku (1a) a spodního nalévacího kelímku (2a) použitého pro vakuovou indukční tavicí pec, včetně Ilustrace indukční cívky použité pro elektrodovou indukční tavicí pec (1b) [53]

4.1.2 Atomizace vody

Atomizace vody je podobná procesu atomizace plynu, ale místo plynu se používá jako rozprašovací médium vysoký tlak vodní páry. Atomizace vody se používá hlavně k výrobě prášků nereaktivních materiálů, jako jsou oceli. V důsledku vyšších rychlostí chlazení ve srovnání s atomizací plynu mají částice nepravidelné tvary. Hlavní výhodou atomizace vody spočívá v menší nákladnosti procesu než u jiných typů atomizace. Nevýhodou je omezení čistoty, zejména u kovů a slitin se sklonem k oxidaci. [24,27]

4.1.3 Plazmová atomizace

Plazmová atomizace je relativně nový proces, který byl vyvinut pro výrobu vysoce čistého prášku reaktivních kovů a slitin s vysokou teplotou tání, jako je titan, zirkonium, tantal atd. Plazmová atomizace umožňuje vyrábět prášky s jemnou distribucí částic s vysoce sférickým tvarem částic a nízkým obsahem kyslíku. Počáteční materiál pro proces atomizace plazmy je kovový drát. Drátová surovina se plní do plazmových hořáků, které rozptylují dráty do kapiček s následným tuhnutím v práškové formě. Distribuce velikosti částic prášku vyrobeného atomizací plazmy je 0-200 mikrometrů.

Počáteční materiály k výrobě práškových kovů jsou velmi důležitou součástí výroby, protože jejich kvalita má vliv na stabilitu výrobního procesu a kvalitu konečného produktu. Pro zajištění opakovatelné výroby kovových součástí jsou důležité konzistentní práškové vlastnosti.

Důležitými vlastnostmi, které jsou potřeba k vrstvení prášku, ke konzistentnímu a předvídatelnému dávkování, jsou zejména dobrý tok, těsné zhuštění a sférický tvar částic. Mezi další charakteristiky patří morfologie, chemické složení a tepelné vlastnosti. [24,27]

4.2 Vlastnosti práškového kovu

Distribuce velikosti částic je jednou z nejdůležitějších vlastností práškového kovu pro použití při aditivní výrobě. Všichni výrobci systémů doporučují používat prášky připravené a dodávané výrobcem systému a výrobce také dává doporučení parametrů prášků použitelných na jejich systémy. Distribuce velikosti částic se obvykle měří laserovými difrakčními metodami a typická zpráva o měření obsahuje graf a tabulku s hodnotami velikosti částic a jejich objemu.

Ke změně distribuce velikosti částic se běžně používá síťová analýza, například k oddělení velkých částic. Typická síťová analýza zahrnuje vnořený sloupec sít s látkou z drátěného pletiva.

Tekutost prášku má vliv na hladký povlak a rovnoměrné dávkování. Hlavními parametry, které mají vliv na tekutost, jsou distribuce velikosti částic, hustota kovu nebo slitiny, tvar částic, morfologie jejich povrchů a vlhkost.

Velmi jemný prášek (menší než 10 mikrometrů) má typicky špatnou tekutost nebo neteče vůbec, ale práškové kompozice, které obsahují jemné nebo velké částice, mají dobrou tekutost.

Pokud má kov nebo slitina vysokou hustotu, prášek tohoto kovu nebo slitiny bude proudit rychleji. Sférický prášek proudí lépe než prášek s nepravidelnou formou, protože částice se nelepí na jiné. Vlhkost prášku způsobuje slepování částic k sobě a vede ke zhoršení výsledků měření tekutosti, proto se důrazně doporučuje před použitím prášek vysušit.

Hustota skeletu ukazuje skutečnou hustotu pevného materiálu slitiny nebo práškového materiálu. Hustota závisí na množství legujících prvků, jejich obsahu ve slitině a fázovém složení materiálu. [27]

4.3 Recyklace prášku

Po dokončení výrobku je z platformy v pracovní komoře odstraněn nadbytečný nevyužitý prášek. K odstranění netaveného materiálu slouží vakuový vysavač. Z vysavače je prášek přemístěn do prosévacího zařízení, kde je po prosetí prášek možno znovu použít. Během tohoto procesu dochází k vyloučení částečně nataveného prášku a dalších, nežádoucích částic.

Recyklace kovového prášku je cenná z hlediska úspory nákladů nebo generování příjmů pro společnost. Přispívá k udržení příznivého životního prostředí prostřednictvím úspory energie, zdrojů a nezvyšování množství znečišťujících látek.

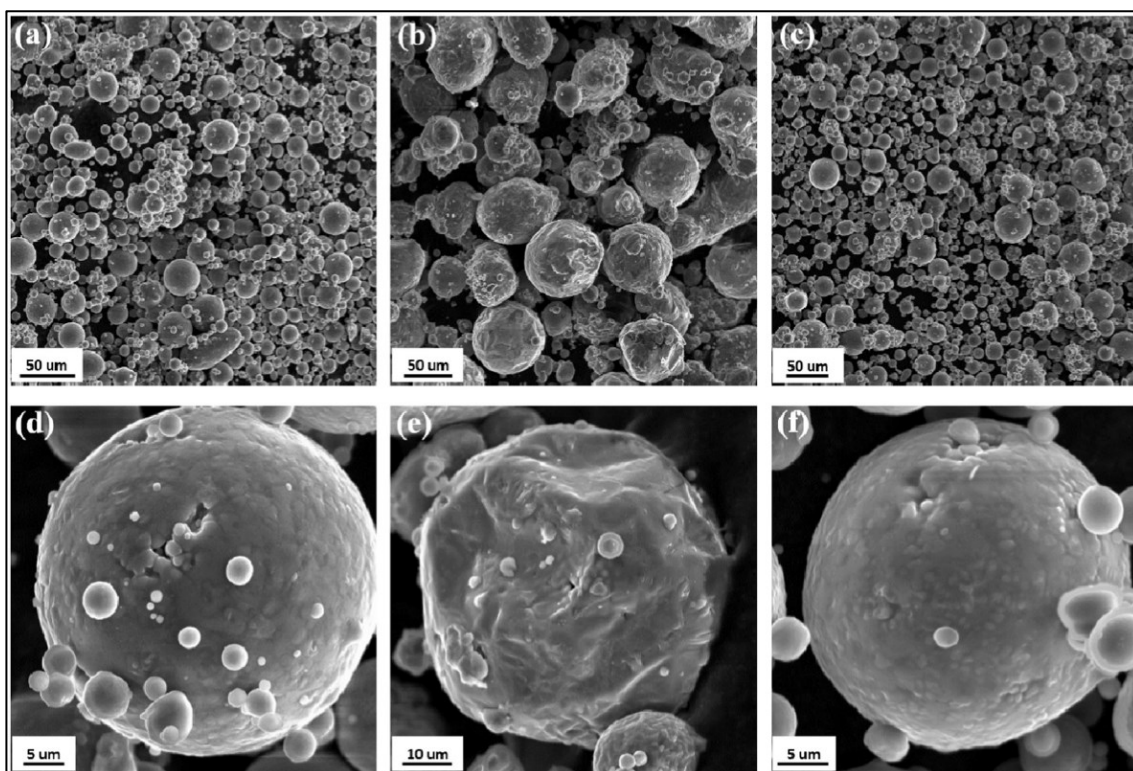
Možnost přebytečný prášek recyklovat a materiál znovu využít, je velkou výhodou SLM technologie. Umožňuje tak téměř 100 % využití materiálu. Nevýhodou může být změna vlastností recyklovaného prášku, na základě měnících se mechanických vlastností jednotlivých dílů. Z tohoto důvodu je sledování kvality recyklovaného prášku nesmírně důležité.

Chemické složení prášku je rovněž podstatné. Usiluje se o výrobu pevných struktur složených z čisté slitiny. Poskytované AM zařízení usilují o vytvoření inertního prostředí, ve kterém jsou uloženy reaktivní prášky a ve kterém dochází k laserovému tavení, takže kovová slitina netvoří při zahřívání oxidy ani nitridy. Také mechanický stav prášku hraje důležitou roli. Je potřeba, aby byl prášek rovnoměrně distribuován a měl ideální tekutost. Tekutost prášku se řídí morfologií zrna, distribucí velikosti prášku a hustotou. Práškové kovy mohou také zachycovat nečistoty z atmosférických plynů. Tyto chemické a mechanické vlastnosti prášku mohou být pozměněny v průběhu opakovaného tavení laserem, což může mít vliv na výsledné vlastnosti vyrobené komponenty.

Rychlé zahřívání vede k vytlačení některých větších kapek tekutého kovu, zatímco zachycený plyn uvnitř zrn prášku jej může poškodit. Prášková zrna se mohou spojit dohromady, aniž by se připojily k součásti, což vytváří nepravidelně tvarované aglomeráty a „satelity“, které mohou ovlivnit vlastnosti prášku. Nevyužitý prášek se prosívá, aby se odstranily větší částice, s cílem zachovat konstantní distribuci velikosti částic. [1]

4.3.1 Vliv recyklace na vlastnosti prášku

Obr. 11 ukazuje morfologii panenských, odpařených a recyklovaných prášků AlSi10Mg_200C při nízkém a vysokém zvětšení pořízených skenovacím elektronovým mikroskopem. Jak je vidět, většina práškových částic v panenských a recyklovaných prášcích má podobnou morfologii, tj. sférickou nebo téměř sférickou. Objevuje se několik částic se zaoblenou podlouhlou morfologií (obr. 11 (a) a (c)). Kromě toho se některé z jemných kulovitých částic jak v panenském, tak v recyklovaném prášku navzájem spojují a vytvářejí satelity. Má se za to, že tato dominantní sférická morfologie pozitivně ovlivňuje proces SLM zvýšením tekutosti prášku, rovnoměrnosti tloušťky práškové vrstvy a přechovací hustoty prášku. Kromě toho lze pozorovat relativně hladké povrchy jak v panenském, tak v recyklovaném prášku (obr. 11 písm. (d) a (f)), což může vést k přiměřené kvalitě povrchu konečného produktu SLM. Odpařený kovový prášek je v podstatě prášek, který je neroztavený, ale zahřátý během výrobního procesu, který nemohl projít sítí kvůli jeho hrubé velikosti částic. Jsou to částice nepravidelně tvarované a nachází se několik částic s téměř sférickou morfologií (obr. 11 (b)). Satelitní morfologie je v odpařeném kovovém prášku zřetelnější. Z hlediska stavu povrchu jsou práškové částice v odpařeném kovovém prášku drsné a na povrchu částic lze detekovat několik výstupků a prohlubní (obr. 1 (e)).



Obrázek 13 Fotky při nízkém a vysokém přiblížení prášků AlSi10Mg_200C. (a) a (d): Panenský prášek; (b) a (e): Odpařený kovový prášek; (c) a (f): Recyklovány. [45]

APS což je zkratka pro Average Particle Size (v překladu Průměrná velikost částic) prášků AlSi10Mg_200C je uvedena v tabulce 2. V tabulce 2 a na obr. 11 lze vidět, že částice odpařeného kovového prášku jsou podstatně větší než panenské a recyklované prášky. Tato hrubá velikost částic by mohla souviset se skutečností, že částice odpařeného kovového prášku absorbovaly energii z laserového paprsku během procesu SLM a slinovaly se navzájem, aby vytvořily větší částice. Kromě toho jsou částice panenského a recyklovaného prášku poměrně jemné a jejich hodnoty APS jsou velmi blízko u sebe. Velikost částic je důležitým parametrem v procesu SLM, protože maximální velikost částic hraje klíčovou roli při určování minimální tloušťky práškové vrstvy. [45]

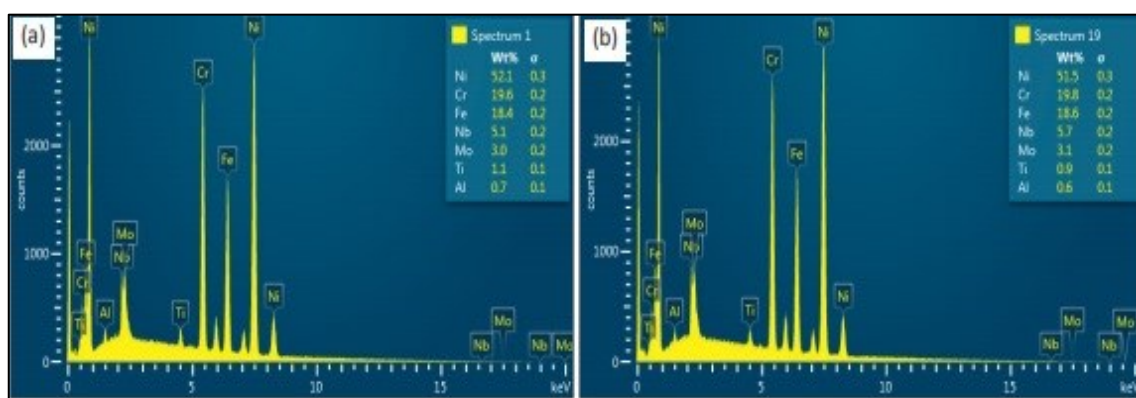
Tabulka 2 Průměrná velikost částic prášků AlSi10Mg 200C [45]

| Typ prášku | Průměrná velikost částic |
|------------------------|---------------------------|
| Panenský prášek | $8,8 \pm 7 \mu\text{m}$ |
| Odpařený kovový prášek | $66,5 \pm 11 \mu\text{m}$ |
| Recyklovaný | $9,9 \pm 8 \mu\text{m}$ |

4.3.2 Vliv recyklace na vlastnosti materiálu

Ve stejné studii Ardila a spol, sledovali vlastnosti a složení materiálu IN718 po první a poslední iteraci. Zkoumání bylo provedeno rentgenovou spektroskopií dispergující energii.

Obrázek 12 ukazuje spektrální práškové složení po první a poslední iteraci. Jak lze pozorovat, takové složení zůstává prakticky stejné i po zvyšujícím se počtu iterací. Variace složení závisí na standardní odchylce hodnoty pro všechny prvky, s výjimkou Ni a Nb, kde je tato odchylka větší, než se očekávalo. Koncentrace Ni je menší při konečné iteraci, zatímco mnohem větší pro Nb (a mírně pro další prvky jako Cr a Fe). Tento výsledek může být způsoben mírnou oxidací Ni v závislosti na následných výrobních procesech, ale celkově prášek IN718 není oxidován, a proto lze předpokládat, že vlastnosti zkušebních částí zůstanou prakticky totožné.



Obrázek 14 Práškové kompozice IN 718 pro (a) první a (b) poslední iteraci [1]

Výsledky měření porozity ukazují, že je velmi podobná ve všech iteracích (téměř 0,1 %). Z tohoto vyplývá, že recyklační proces umožňuje výrobu dílů s opětovně použitým práškem, aniž by se výrazně změnily vlastnosti materiálu. [1]

5 Hliník a jeho slitiny

Hliník a jeho slitiny jsou jedny z nejčastěji využívaných konstrukčních materiálů. V přirozeném stavu se hliník vyskytuje převážně jako sloučenina. Nejznámější rudou je bauxit (hydratovaný oxid hlinitý), z něhož je možno elektrolyticky vyrobit čistý hliník. Hustota čistého hliníku je cca 2770 kg.m^{-3} , teplota tavení $660 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a modul pružnosti $71,7 \text{ GPa}$.

Hliník a jeho slitiny mají vysokou specifickou pevnost, která je v případě některých slitin minimálně srovnatelná s různými druhy ocelí. Vyznačují se také vysokou korozní odolností, nelze opomenout ani vysokou tepelnou a elektrickou vodivost. Slitiny hliníku můžeme rozdělit podle funkce na slévárenské nebo k tváření, na vytvrditelné nebo nevytvrditelné.

„Způsob značení hliníku a jeho slitin se řídí normou ČSN EN 573. Obecná formule má tento tvar: EN AX – nnnn, kde obecným X může být W – pro tvářené výrobky, nebo dle tvaru výrobku, B – pro nelegované nebo slitinové ingoty pro přetavení, C – odlitky, M – předslitiny; nnnn – skupina číslic označující chemické složení: první číslice značí hlavní přísadový prvek, druhá číslice ve skupinách 2xxx až 8xxx označuje modifikaci slitiny, třetí a čtvrtá číslice pouze k označení jednotlivých slitin dané skupiny; n – písmeno, které u tvářených slitin nemusí být uváděno, označuje materiál používaný v České republice (národní změnu).“ [42]

Hliník je jako lehký stavební materiál vhodný pro výrobu dílů vyžadujících dobré mechanické vlastnosti v poměru s hmotností. Časté využívání hliníkových slitin ve výrobě lze také vysvětlit jejich relativně nízkou nákladovostí. Současný stav techniky SLM se zaměřuje především na prášky Al-Si. AlSi12 a AlSi10Mg jsou díky malému rozdílu mezi teplotou likvidu a solidu (bod tání a tuhnutí), ve srovnání s vysokopevnostními hliníkovými slitinami, relativně snadno zpracovatelné. Právě slitina AlSi10Mg byla mezi prvními vybrána k přípravě procesu SLM z důvodu dobré svařitelnosti, tepelné vodivosti a korozní odolnosti. Slitiny hliníku mají svou výhodu v nízké hmotnosti a relativně vysoké korozní odolnosti. Slitiny AlSi10Mg a AlSi12 jsou díky úzkému teplotnímu intervalu mezi pevnou fází a taveninou často využívány k odlévání. [43]

Během výroby Al 6061, kterou provedla společnost SLM se ukázalo, že je tento prášek nestabilní ke zpracování. Poté byl proveden další výzkum na Al 6061 ve srovnání s AlSi12 prostřednictvím SLM. V tomto případě byly potíže při zpracování hliníku způsobeny tvorbou tenkých oxidových filmů, které vedly k porositám. Další výzvu tvoří vysoká odrazivost Al prášku.

Většina prací zabývajících se SLM hliníkových slitin je na bázi AlSi10Mg, běžné lité slitiny. Ve studii provedené Kempenem a spol. zjistili, že kvalita komponenty je kromě parametrů zpracování závislá na morfologii a obsahu prášku. Malé a kulové prášky s vyšším obsahem křemíku obsahovaly vyšší relativní hustotu ve složce SLM, než větší a nepravidelné

tvarované prášky. Další literatury zabývající se technologií SLM, ve svých výzkumech zahrnují také čistý hliník, Al6061, AlSi12 a AlMg. [33]

V současné době lze spolehlivě vytisknout pouze několik slitin, z nichž nejdůležitější jsou AlSi10Mg, TiAl6V4, CoCr a Inconel 718. Drtivou většinu z více než 5 500 slitin používaných dnes nelze vyrobit aditivně, protože dynamika tání a tuhnutí během procesu tisku vede k netolerovatelným mikrostrukturám s velkými sloupcovými zrny a periodickými trhlinami. [44]

Slitiny hliníku jsou v dnešní době uzavřenou skupinou, ale pořád se usiluje o dosažení lepších mechanických vlastností těchto slitin. Rozvíjí se zpracování hliníkových slitin z prášku, uskutečňovaného izotermickým, izostatickým a superplastickým tvářením. Dále bude vyvíjeno spojování pomocí laserového nebo elektronového paprsku. Problémy při tuhnutí všech hliníkových vrstev tvoří přítomnost vodíku. Ten zůstane uzavřen ve struktuře v podobě pórů a vytváří nedostatečné spojení vrstev v důsledku vysoké stability oxidických vrstev. [42]

6 Experimentální část

6.1 Tiskárna TruPrint 1000

Výrobce zařízení, které bylo použito pro tisk všech vzorků v tomto výzkumu, je firma TRUMPF. Byla založena v roce 1923 ve Stuttgartu jako řada mechanických dílen a od té doby se vyvinula v jednu z předních světových společností pro obráběcí stroje, laserovou technologii a elektroniku pro průmyslové aplikace. Další informace jsou dostupné v tabulce 3. [8]

Tabulka 3 Technické údaje 3D tiskárny TruPrint 1000 [1]

| Parametr | Hodnota | Jednotka |
|--|--------------------------------------|--------------------|
| Objem prostoru instalace (VÁLEC) | Průměr 100 x 100 x 100 Výška | mm |
| Efektivní objem prostoru instalace (STANDARD) | Průměr 98 x 100 Výška | mm |
| Výkon laseru (VLÁKNOVÝ LASER TRUMPF) | 200 Volitelné vícevrstvé: 2 x 200 | W |
| Průměr paprsku (STANDARD) | 55 | μm |
| Průměr paprsku (VOLITELNÉ VYBAVENÍ) | 30 | μm |
| Tloušťka vrstvy | 10–50 | μm |
| Rychlost tavení | 2–18 | cm ³ /h |
| Rychlost skenování | 3 | m/s |
| Minimální měřitelný obsah kyslíku (STANDARD) | Až 3000 | ppm |
| Minimální měřitelný obsah kyslíku (VOLITELNÉ VYBAVENÍ) | Až 100 | ppm |
| Elektrická přípojka (NAPĚTÍ) | 230 | V |
| Elektrická přípojka (INTENZITA PROUDU) | 7 | A |
| Elektrická přípojka (FREKVENCE) | 50/60 | Hz |
| Ochranný plyn | Dusík, argon | - |
| Rozměry (Š X V X H) | 1445 x 1680 x 730 | mm |
| Hmotnost | 650 | kg |

Mezi hlavní přednosti 3D tiskárny patří především:

- Snadné a intuitivní ovládání - díky malé velikosti je TruPrint 1000 snadno ovladatelný. Díky intuitivní dotykové obrazovce a nastavení průvodce je obsluha velmi jednoduchá. Operátor je krok za krokem aktivně veden úkoly.
- Vysoká rychlost zpracování díky inovativnímu systému nanášení vrstev - TruPrint 1000 koordinuje práškové lakování a laserovou expozici paralelně se součástmi. To snižuje prostoje na minimum, což umožňuje vyšší rychlosti zpracování. Komponenta naklápěcí vrstvy s profilem X umožňuje robustní a rovnoměrné přetírání prášku.
- Mobilní provoz a monitorování - s aplikací MobileControl je možné ovládat TruPrint 1000 obzvláště flexibilně pomocí tabletu. Provozovatel sleduje výrobní proces prostřednictvím živého obrazu. Volbou sledování práškového lože se může monitorovat kvality vrstvy po vrstvě. Toto monitorovací řešení také poskytuje komplexní sledování stavu stroje a plnou transparentnost produktivity stroje.
- Maximální produktivita - vícevrstvá varianta nabízí zvýšení produktivity až o 80% ve srovnání se standardním strojem. Při stejné míře využití poskytuje možnost s vláknovým laserem TRUMPF 2 x 200 W vyšší částečný výstup. Zkrácená doba zpracování na úlohu sestavení umožňuje různé obchodní modely a umožňuje rychlejší dostupnost dílů. Kompenzujte vrcholy objednávek pomocí možnosti násobení. [7]



Obrázek 15 3D tiskárna TruPrint 1000

6.2 Pyknometr AccuPyc II 1340

Plynová pyknometrie je považována za jednu z nejspolehlivějších technik pro získání skutečného, absolutního, kosterního a zdánlivého objemu a hustoty. Tato technika je nedestruktivní, protože k měření objemu používá metodu vytlačování plynu. Jako vytlačovací médium se používají inertní plyny, jako je helium nebo dusík. Výpočty hustoty pomocí metody vytlačování plynu jsou mnohem přesnější a reprodukovatelnější než tradiční metoda vytěšňování vody Archimedovým způsobem.

Pyknometr AccuPyc II 1345 je rychlý, plně automatický pyknometr, poskytující vysokorychlostní, vysoce přesné měření objemu a výpočty skutečné hustoty na široké škále prášků, pevných látek a kalů. Poté, co jsou analýzy zahájeny několika stisky kláves, jsou shromážděna data, provedeny výpočty a zobrazeny výsledky. Vyžaduje se minimální pozornost obsluhy.

Na základní úrovni lze objem pevného materiálu vypočítat změřením jeho délky, šířky a tloušťky. Mnoho materiálů má však ve své struktuře povrchové nepravidelnosti, malé zlomeniny, trhliny a póry.

Některé z těchto dutin nebo pórů jsou otevřené na povrchu nebo uzavřené ve struktuře pevného materiálu. Proto rozdíly v objemu materiálu závisí na technice měření, způsobu měření a podmínkách, za kterých byly měření provedeny.

Tato technika používá metodu vytlačování plynu k přesnému měření objemu. Jako vytlačovací médium se používají inertní plyny, helium nebo dusík. Vzorek je utěsněn v přístrojové komoře o známém objemu, je přidán vhodný inertní plyn a poté expandován do jiného přesného vnitřního objemu.

Tlaky pozorované po naplnění komory pro vzorky a jejím vypouštění do druhé prázdné komory, umožňují výpočet objemu pevné fáze vzorku. Molekuly hélia rychle vyplňují póry o průměru menším než jeden Ångström (Å), což je jednotka délky, která se používá při vyjadřování velikosti atomů (0,1 nm). Plyn vytlačuje pouze pevné fáze vzorku. Rozdělením tohoto objemu na hmotnost vzorku se získá hustota vytlačení plynu. [3]



Obrázek 16 Pyknometr AccuPyc II 1340 [3]

6.3 Malvern Mastersizer 3000

Přední analyzátor velikosti částic Mastersizer 3000 je všestranný kompaktní přístroj, který se přizpůsobuje analytickým požadavkům, omezením zdrojů a náročným pracovním postupům dnešních laboratoří. Spojením know-how v oblasti inženýrství a aplikací přináší:

- Špičkový výkon pro určování velikosti částic, který generuje robustní a spolehlivá data, která jsou potřebná.
- Intuitivní software s vestavěnými odbornými znalostmi, který usnadňuje analytické pracovní vytížení a umožňuje vyvíjet a provozovat různé metody efektivně.
- Flexibilní možnosti vytváření přehledů, kde je možno zobrazit data přesně podle přání, přizpůsobitelná potřebám.
- Rychlé a efektivní možnosti přípravy vzorků pro suspenze, emulze a prášky, přizpůsobené různým požadavkům, aby poskytly řešení k optimalizaci metod a zajištění nepřetržité kontroly.

Mastersizer 3000 používá techniku laserové difrakce k měření velikosti částic a distribuce velikosti částic materiálů. To se provádí měřením intenzity rozptýleného světla, kdy laserový paprsek prochází rozptýleným vzorkem částic. Data jsou poté analyzována pro výpočet velikosti částic, které vytvořily rozptylový vzor. Tři hlavní prvky umožňují systému konzistentně a spolehlivě dodávat přesná a robustní data pro určování velikosti částic, která jsou zásadní pro efektivní provoz průmyslových procesů.

Optická lavice – Mastersizer 3000 poskytuje měření od 10 nm do 3,5 mm pomocí jediné optické měřicí dráhy, která je vhodná pro extrémně široký rozsah aplikací. Dispergovaný vzorek prochází měřicí oblastí optické lavice, kde částice osvětluje laserový paprsek. Série detektorů přesně měří intenzitu světla rozptýlenými částicemi ve vzorku, pro vlnové délky červeného i modrého světla a v širokém rozsahu úhlů.

Jednotky pro dispergování vzorků – Mastersizer 3000 nabízí výběr šesti doplňků pro mokrou disperzi, pro zpracování rozšířeného rozsahu objemů vzorků a široké škály dispergačních činidel. Špičkový suchý disperzní systém umožňuje rychlou a reprodukovatelnou práškovou disperzi, dokonce i pro křehčí materiály. Vzorkové disperzní jednotky zajišťují, že částice jsou dodávány do měřicí oblasti optické lavice ve správné koncentraci a ve vhodném stabilním stavu disperze k zajištění přesných, reprodukovatelných měření.

Software Mastersizer 3000 splňuje rostoucí poptávku po snadno použitelných nástrojích, které poskytují vynikající výsledky bez neustálého vstupu odborníků. Software řídí systém během procesu měření a analyzuje rozptylová data pro výpočet distribuce velikosti částic. Jeho intuitivní rozhraní vede uživatele ve všech fázích procesu, od výběru robustní metody až po rutinní měření a hlášení výsledků. Vestavěné odborné rady týkající se výkonu metody a kvality výsledků snižují požadavky na výcvik a zjednodušují a zrychlují analýzu velikosti částic. [19]



Obrázek 17 Mastersizer 3000 [19]

Tabulka 4 Technické údaje přístroje Mastersizer 3000 [19]

| Všeobecné | |
|--|--|
| Velikost částic: | Suspenze, emulze, suché prášky |
| Princip: | Rozptyl laserového světla |
| Analýza: | Mie a Fraunhoferův rozptyl |
| Rychlost získávání dat: | 10 kHz |
| Typická doba měření: | <10 sec |
| Rozměry (š,d,v): | 690 mm x 300 mm x 450 mm |
| Hmotnost: | 30 kg |
| Optika | |
| Zdroj červeného světla: | Max. 4 mW He-Ne, 632,8 nm |
| Zdroj modrého světla: | Max. 10mW LED, 470nm |
| Uspořádání objektivu: | Reverse Fourier (konvergentní paprsek) |
| Efektivní ohnisková vzdálenost: | 300 mm |
| Detektor | |
| Uspořádání: | Pole s dlouhými rozestupy |
| Úhlový rozsah: | 0,015 - 144 stupňů |
| Zarovnání: | Automatické |
| Velikost | |
| Velikost částic: | 0,01 - 3500 μm * |
| Počet velikostních tříd: | 100 (uživatelsky nastavitelné) |
| Přesnost: | lepší než 0,6 % ** |
| Přesnost / opakovatelnost: | lepší než 0,5 % odchylka * |
| Reprodukovatelnost: | lepší než 1 % variace * |
| Software | |
| 21 CFR část 11: | Umožňuje provozní režim, který pomáhá s dodržováním požadavků ER / ES |
| Soulad se systémem | |
| Bezpečnost laseru: | Třída 1, IEC60825-1: 2007 a CFR Kapitola I: Podkapitola J: Část 1040 (CDRH) |
| Regulační testování: | RoHS a WEEE kompatibilní CE / FCC Splňuje požadavky evropské směrnice o nízkém napětí |
| Systém | |
| Příkon: | 100/240 v, 50/60 Hz 50 W (bez připojených disperzních jednotek) 200 W maximum (připojeny 2 disperzní jednotky) |
| Vlhkost: | 80 % maximum pro teploty do 31 ° C, lineárně klesající na 50 % při 40 ° C. Nekondenzující. |
| Provozní teplota (° C): | + 5 ° C až + 40 ° C |
| Skladovací teplota produktu: | -20 ° C až + 50 ° C |
| Stupeň ochrany proti vniknutí (IP): | IP41B |
| Poznámky | |
| *: Závisí na přípravě vzorku a vzorku. | |
| **: Přesnost definovaná pro měření monomodálních latexových standardů. Tato specifikace odpovídá nejistotě výrobce ohledně velikosti latexu. Závisí na přípravě vzorku a vzorku. | |

6.4 Testování pomocí metody DOE

Testovací metoda DOE je systematická metoda určující vztah mezi faktory ovlivňujícími proces a výstupem z tohoto procesu. Jinými slovy se používá k nalezení vztahů mezi příčinami a následky. Tyto informace jsou potřebné pro řízení vstupů procesu za účelem optimalizace výstupu. [54]

Pro vyhodnocení výsledků je použit dvojitý faktoriál se čtyřmi úrovněmi. Tato metoda umožňuje nalezení požadovaného výsledku bez velkého množství dat a výpočtů. Základem DOE je nastavení faktorů. Pro experiment jsou jako faktory zvoleny výkon laseru a skenovací rychlost. Tyto hodnoty mají podobu čísla, které je poté označováno jako úroveň. Zadáním faktorů a úrovní dosáhneme výsledku se specifickými parametry, jakými jsou tahové napětí, míra porozity apod. Tyto výsledky se nazývají odezvy. Jinak řečeno faktory, které mají proměnné úrovně, ovlivňující proces a vyvolávají odezvy. Pro stanovení plně faktoriálního DOE se používá rovnice (2):

$$n = l^f \quad (2)$$

V této rovnici n představuje množství nezbytných experimentů, l označuje počet úrovní faktorů a f je množství faktorů. Tabulka 5 demonstruje kolik experimentů je nutné provést v závislosti na množství faktorů a úrovní.

Tabulka 5 Počet experimentu v závislosti na počtu úrovní a faktorů

| Počet úrovní | Počet faktorů | Počet experimentů |
|--------------|---------------|-------------------|
| 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 4 |
| 2 | 4 | 16 |
| 4 | 3 | 64 |
| 2 | 7 | 128 |

7 Výzkum práškové slitiny AlSi10Mg

Pro tuto diplomovou práci byla použita hliníková slitina AlSi10Mg. Dodavatel slitiny je společnost TRUMPF, která speciálně navrhuje kovové prášky tak, aby zajistily optimální provozní podmínky při provozu strojů řady TruPrint. Během vývoje se prášky a testované části SLM podrobují přísným chemickým a fyzikálním analýzám. Pro podrobné analýzy se používají technologie jako je skenovací elektronová mikroskopie (SEM).

Každá šarže je zkoumána z hlediska charakteristických vlastností, jako je distribuce velikosti zrn, průtok a objemová hustota. Až po úspěšném ověření je šarže připravena k prodeji. Tímto způsobem zůstává kvalita procesu vysoká a reprodukovatelná. [20]



Obrázek 18 Příklad 1,5kg balení kovového prášku od firmy TRUMPF

AlSi10Mg je typická slitina pro odlévání s dobrými slévárenskými vlastnostmi. Obvykle se používá pro odlitky s tenkými stěnami a složitou geometrií. Nabízí dobrou pevnost, tvrdost a dynamické vlastnosti, a proto se používá také pro součásti vystavené vysokému zatížení.

Díly vyrobené z této slitiny jsou ideální pro aplikace, které vyžadují kombinaci dobrých tepelných vlastností a nízké hmotnosti. Mohou být dále zpracovány elektrojiskrovým obráběním, svařováním, leštěním a lakováním podle potřeby. Obvykle jsou odlévané komponenty u tohoto typu hliníkové slitiny často tepelně zpracovány za účelem zlepšení mechanických vlastností, například použitím cyklu žíhání, kalení a disperzního vytvrzení. Proces laserového slinování se vyznačuje extrémně rychlým tavením a opětovným tuhnutím. To vede k odpovídajícím mechanickým vlastnostem v původním stavu, který je podobný tepelně zpracovaným odlitkům. Proto se takové vytvrzovací tepelné zpracování nedoporučuje pro laserem slinované součásti, ale spíše cyklem pro snížení vnitřního napětí na 2 hodiny při 300 ° C. Díky vytváření vrstev mají části určitou anizotropii, kterou lze vhodným tepelným zpracováním redukovat nebo odstranit. Typické použití je v automobilovém průmyslu, kde se používá jako materiál pro výrobu kompresorů do klimatizací. [10]

Tabulka 6 Chemické složení slitiny AlSi10Mg [4]

| | | |
|-----------------------------|---|--|
| Chemické složení | Hliník (Al) | Zůstatek |
| | Křemík (Si) | 9–11 % |
| | Železo (Fe) | 0 - 0,055 % |
| | Měď (Cu) | 0 - 0,1 % |
| | Mangan (Mn) | 0 - 0,45 % |
| | Hořčík (Mg) | 0,20 - 0,45 % |
| | Nikl (Ni) | 0 - 0,05 % |
| | Zinek (Zn) | 0 - 0,10 % |
| | Olovo (Pb) | 0 - 0,05 % |
| | Cín (Sn) | 0 - 0,05 % |
| | Titan (Ti) | 0 - 0,15 % |
| Fyzikální vlastnosti | Relativní hustota | Cca. 99,85 % |
| | Hustota | 2,67 g/cm ³ |
| | Tepelná vodivost | 130 W/mK to 190 W/mK |
| | Rozsah tání | 570 °C to 590 °C |
| | Koeficient tepelné roztažnosti v rozmezí 0 ° C až 100 ° C | 20 10 ⁻⁶ K ⁻¹ až 21 10 ⁻⁶ K ⁻¹ |

Pro ověření chemického složení byla při výzkumu provedena spektrální analýza kovového prášku ve všech pěti fázích. Výsledky lze vidět v tabulce č. 7. Z tabulky lze odvodit, že přesévání prášku samo o sobě nemá velmi razantní dopad na chemické složení.

Tabulka 7 Spektrální analýza kovového prášku AlSi10Mg měřená v jednotlivých fázích výzkumu pomocí přístroje Mastersizer 3000

| Panenský prášek | | |
|-----------------|--------|--------|
| Prvek | Wt [%] | At [%] |
| Hořčík (Mg) | 0,91 | 1,01 |
| Hliník (Al) | 86,14 | 86,69 |
| Křemík (Si) | 12,15 | 11,75 |
| Argon (Ar) | 0,80 | 0,55 |
| Celkem | 100,00 | 100,00 |

| 1x Přesetý prášek | | |
|-------------------|--------|--------|
| Prvek | Wt [%] | At [%] |
| Hořčík (Mg) | 0,95 | 1,06 |
| Hliník (Al) | 86,52 | 87,05 |
| Křemík (Si) | 11,77 | 11,38 |
| Argon (Ar) | 0,76 | 0,52 |
| Celkem | 100,00 | 100,00 |

| 2x Přesetý prášek | | |
|-------------------|--------|--------|
| Prvek | Wt [%] | At [%] |
| Hořčík (Mg) | 0,93 | 1,04 |
| Hliník (Al) | 86,06 | 86,65 |
| Křemík (Si) | 12,07 | 11,67 |
| Argon (Ar) | 0,93 | 0,63 |
| Celkem | 100,00 | 100,00 |

| Nepřesety prášek | | |
|------------------|--------|--------|
| Prvek | Wt [%] | At [%] |
| Hořčík (Mg) | 0,94 | 1,06 |
| Hliník (Al) | 86,31 | 86,89 |
| Křemík (Si) | 11,78 | 11,39 |
| Argon (Ar) | 0,97 | 0,66 |
| Celkem | 100,00 | 100,00 |

| Odpadní prášek | | |
|----------------|--------|--------|
| Prvek | Wt [%] | At [%] |
| Hořčík (Mg) | 1,02 | 1,14 |
| Hliník (Al) | 84,96 | 85,51 |
| Křemík (Si) | 13,31 | 12,86 |
| Argon (Ar) | 0,71 | 0,49 |
| Celkem | 100,00 | 100,00 |

7.1 Morfologie kovového prášku

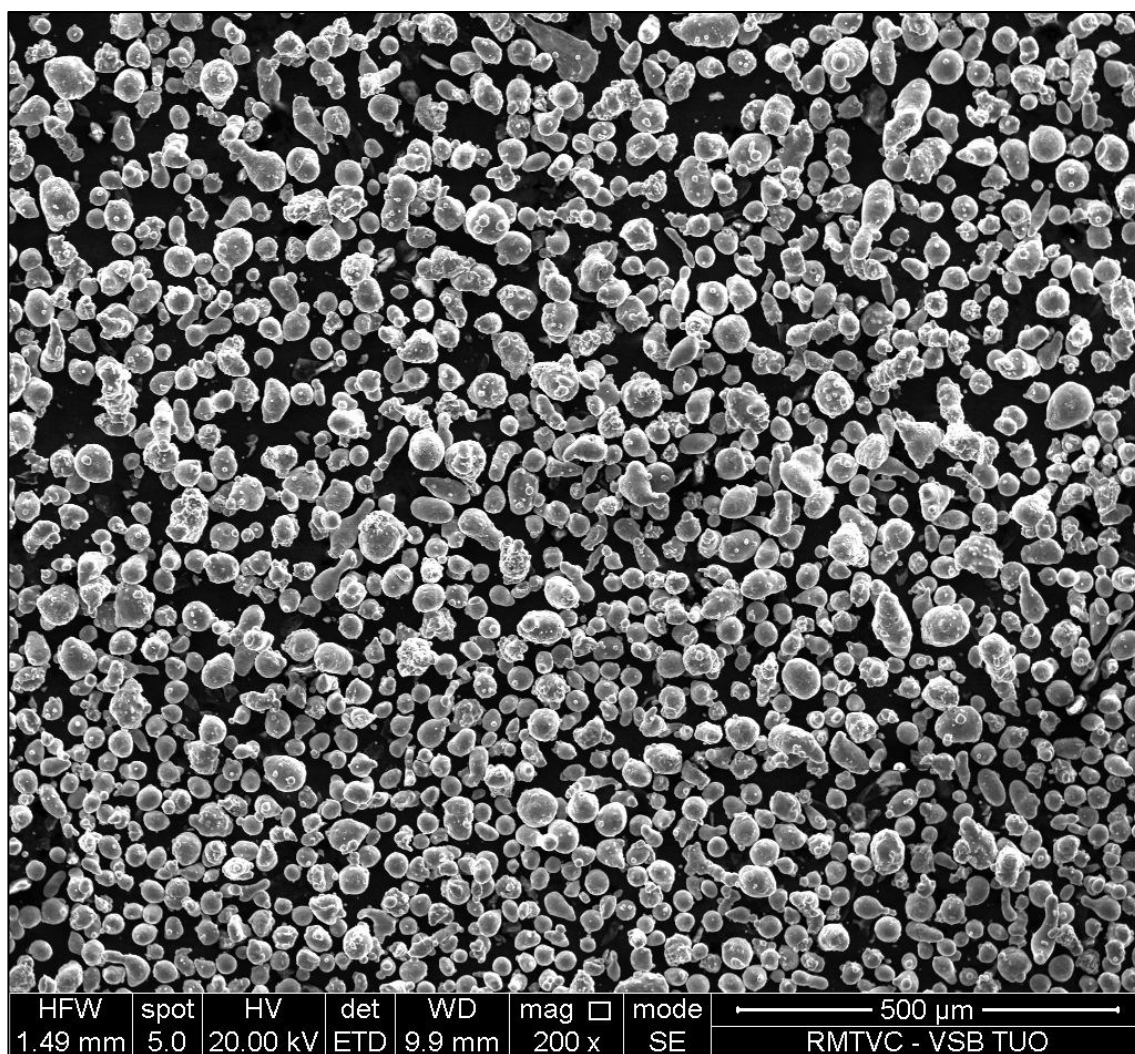
Morfologie prášku je velice důležitou charakteristickou vlastností ovlivňující nanášení kovového prášku laserem z pohledu přechovací hustoty a tekutosti. Tvar práškových částic byl kvalitativně analyzován pomocí elektronového mikroskopu (SEM). Každý prášek byl studován, aby se vizuálně vyhodnotila kvalita z hlediska obsahu satelitů, sféricity a dalších defektů, kterými mohou být např. fúze částic, nečistoty plynů, které mohou být přilepeny k částicím kovového prášku, spečené částice, kterým si jinak říká aglomerace, kulovité částice či částice s dendritickou strukturou. Hodnocení bylo provedeno s cílem porovnat prášky ve srovnání s ostatními fázemi prášku. Je důležité říct, že morfologie prášku závisí na metodě výroby kovového prášku, jelikož různé typy výroby produkují různé tvary částic.

Nejdůležitější vlastnosti kovových prášku jsou [53]:

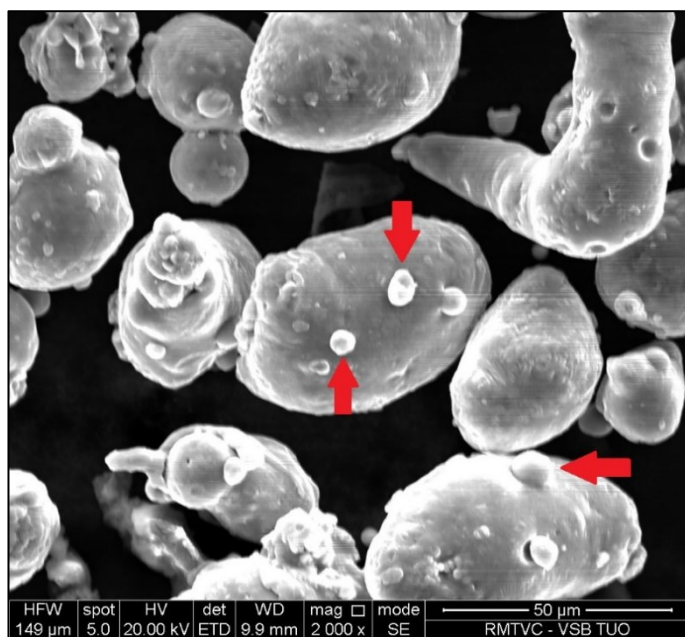
- Sfěrický tvar
- Nízká vnitřní porozita

- Vysoká čistota
- Nízký počet malých částic přilepených k povrchu větší částice – tzv. „satelitů“
- Nízký nebo žádný obsah nežádoucích povrchových pórů
- Přiléhavé rozložení částic
- Hladký povrch

Níže na obrázku 17 je kovový prášek ve formě, ve které byl dodán přímo od výrobce. Z obrázku je patrné, že zrna prášku mají přibližně stejnou velikost, avšak mírně nepravidelný tvar včetně menších částic přilepených k povrchu větších částic tzv. „satelitů“. Satelity vytváří atomizace v plynu argonu, což je způsob výroby obecně generující více satelitů než plazmový sprej. Plazmový sprej je alternativní způsob výroby kovových prášků. Kvalita prášku, pokud jde o obsah satelitů, je do značné míry ovlivněna pouze samotným dodavatelem.

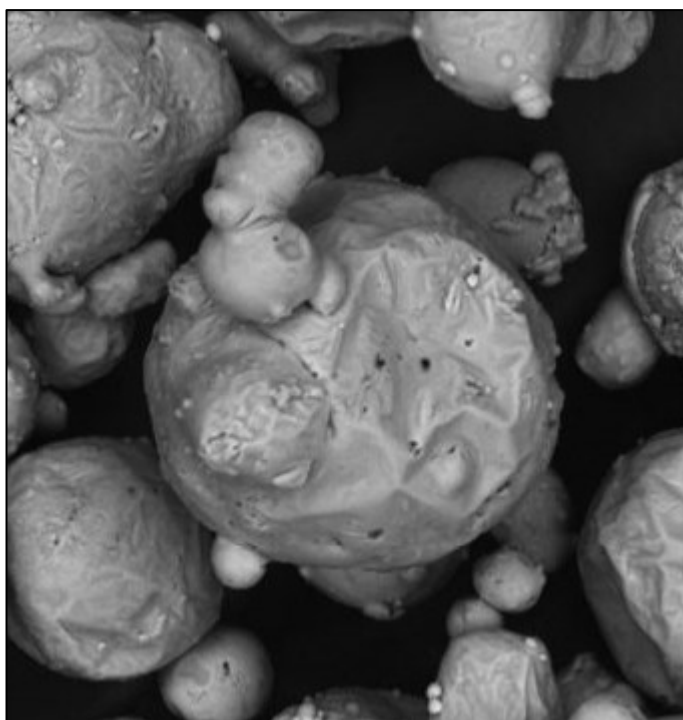


Obrázek 19 Snímek panenského kovového prášku AlSi10Mg, zvětšení 200 x



Obrázek 20 Označení satelitů, zvětšení 2000 x

Na obrázku 19 je možné vidět poškození částice kovového prášku, ke kterému došlo s největší pravděpodobností vlivem laseru. Tato částice je jednou z mnoha, která během přesévání uvízla na sítu a je nevhodná pro další použití. Z tohoto důvodu je považována za odpadní prášek.

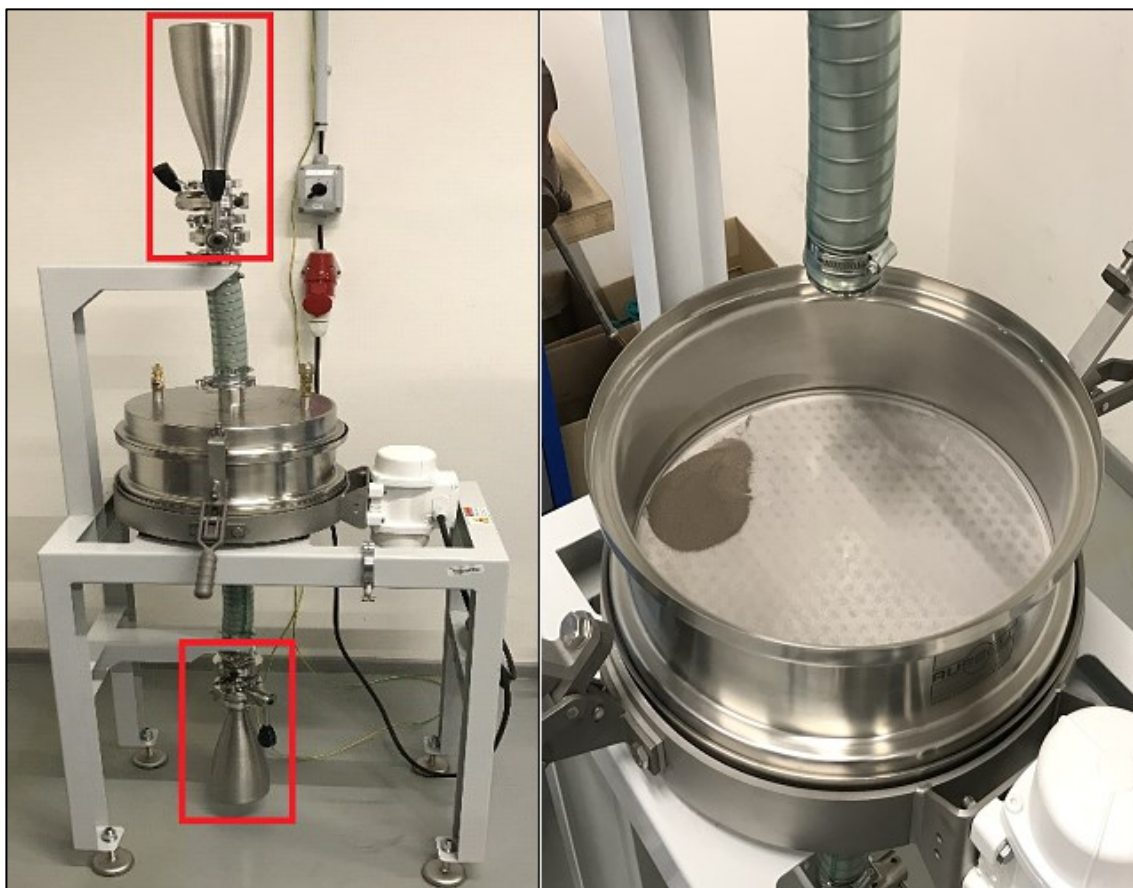


Obrázek 21 Poškozená částice prášku, zvětšení 500 x

7.2 Měření distribuce velikosti částic

Pro měření distribuce velikosti částic kovového prášku AlSi10Mg byla použita laserová difrakce. Použitý prášek byl dodán firmou TRUMPF. Více o kovovém prášku je popsáno v kapitole 7.

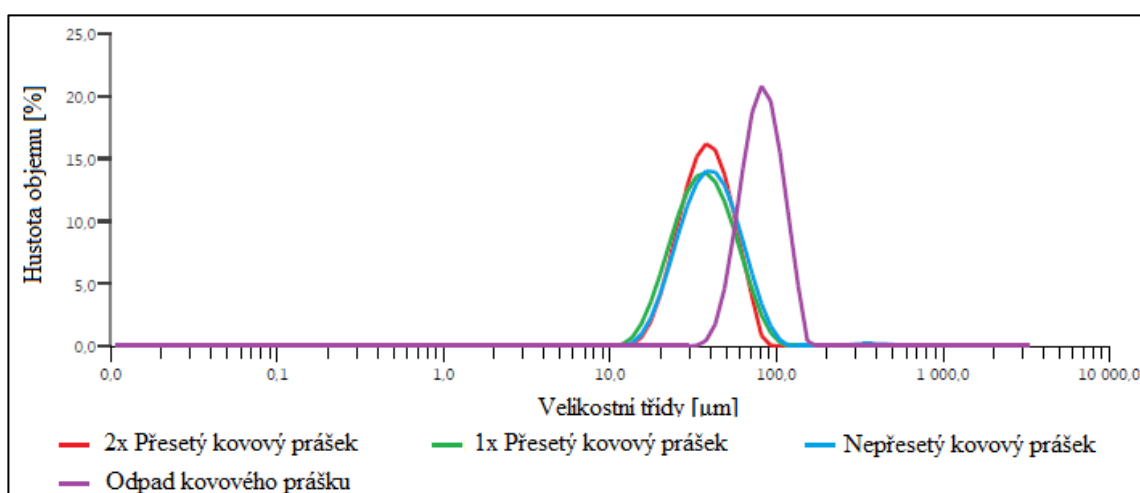
Prosévání prášku probíhalo na zařízení dodávané firmou Renishaw. Tato stanice je po celou dobu procesu přesívání napojena na přívod argonu z důvodu kontaminace kovového prášku. K prosévací stanici se na horní stranu připevní nádoba naplněná použitým kovovým práškem (označeno červeně na horní straně obrázku 21), který po uvolnění propadá přes síto do prázdné spodní nádoby (spodní strana obrázku 21). Pro optimální přesetí kovového prášku je nutné nechat stanici zapnutou alespoň 10 minut. Během procesu se vibračním pohybem oddělí prášek od větších velikostí částic, než je velikost „oka“ síta. V tomto případě je to $45 \pm 15 \mu\text{m}$. Je nutno zmínit, že při snaze oddělit spečené či roztavené částice o velikosti větší než $45 \mu\text{m}$ se díky nepravidelným tvarům částic stává, že i tyto větší částice přesto propadnou okem síta.



Obrázek 22 Prosévací stanice od firmy Renishaw, včetně náhledu dovnitř přístroje [5]

Tabulka 8 Měření distribuce a velikosti částic pomocí přístroje Mastersizer 3000

| Vzorek | Průměr částic v daném měření | Aritmetický průměr | d10 | d50 | d90 | Šířka distribuce |
|------------|------------------------------|--------------------|--------|--------|---------|------------------|
| | [μm] | | | | | |
| Panenský | 33,000 | 42,367 ± 15,826 | 24,700 | 39,300 | 63,100 | 0,978 |
| 1x Přesetý | 33,500 | 40,033 ± 16,975 | 21,300 | 36,400 | 62,400 | 1,128 |
| 2x Přesetý | 35,200 | 39,900 ± 14,454 | 23,400 | 37,700 | 58,600 | 0,933 |
| Nepřesety | 36,600 | 43,367 ± 18,199 | 23,200 | 39,600 | 67,300 | 1,112 |
| Odpad | 77,900 | 84,500 ± 24,552 | 56,100 | 81,400 | 116,000 | 0,730 |



Obrázek 23 Srovnání velikosti částic kovového prášku

7.3 Závěr a diskuze

Výzkum kovového prášku by měl být nedílnou součástí dalších studií v oblasti aditivní technologie a mimo jiné byl také proto zvolen jako jeden z hlavních cílů této práce. Většina výzkumu byla provedena ve spolupráci s Fakultou Materiálově-technologickou – VŠB – TUO. Provedené testy potvrdily všeobecný fakt, že morfologie prášku z velké části souvisí s technologií jeho výroby. Slitina AlSi10Mg, použita v tomto výzkumu, byla vyrobena metodou atomizace plynů. Možným návrhem experimentu je srovnání přesetých prášků vyrobených odlišnými metodami.

Individuálním zkoumáním všech pěti fází prášku (panenský, 1x přesetý, 2x přesetý, nepřesetý a odpad) pomocí elektronového mikroskopu bylo zjištěno, že tvar částic není pokaždé rovnoměrný. V kovovém prášku, a to jak v panenském, tak i v přesetém, byly odhaleny protažené, válečkovité a nepravidelné tvary. Všechny fáze prášku obsahovaly satelity či spojené částice. V přesetém prášku se zvýšil počet nepravidelných částic stejně tak, jako částic se satelity. Nepřesetý a odpadní prášek obsahoval poměrně velké množství poškozených částic,

což bylo s největší pravděpodobností způsobeno působením laseru. V těchto dvou fázích se rovněž nacházely spečené částice či částice s přichycenými nečistotami. Obecně lze říct, že proséváním prášku dochází k nárustu počtu větších částic a snížení počtu menších částic. Spektrální analýza rovněž neprokázala výrazné změny v chemickém složení práškového kovu.

Přesto zde není pochyb o tom, že recyklovaný prášek je vhodné použít pro další tisk, aniž by výsledný produkt utrpěl na kvalitě. Tento fakt, spolu z možností tvořit nepravidelné tvary součástí, které by byly konvenčními způsoby výroby jen velice těžko vyrobitelné, nebo by nebyly vyrobitelné vůbec, řadí SLM mezi jedinečnou, ekonomickou, a především ekologickou technologii.

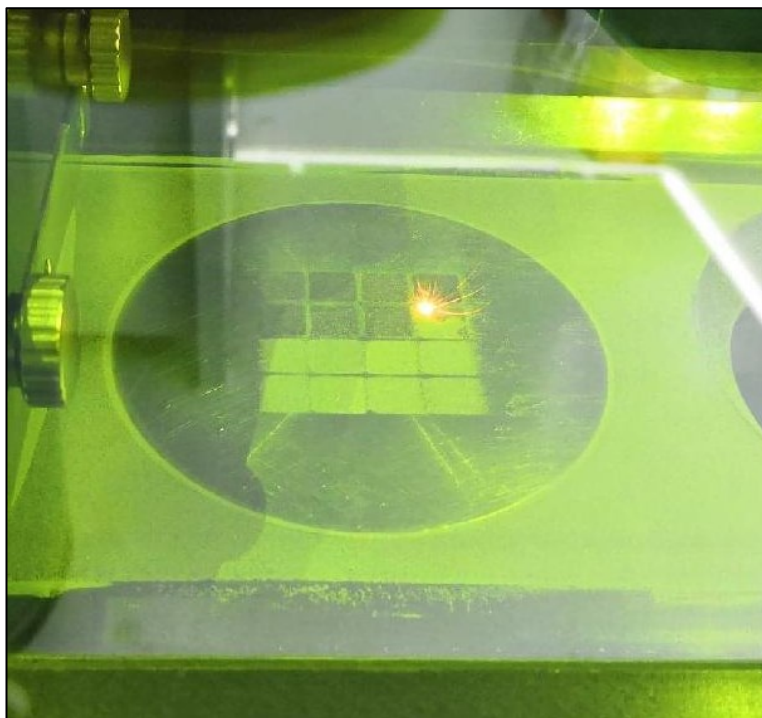
Vhodným doplněním výsledku by bylo použití počítačové tomografie, kdy za pomoci rentgenového záření procházejícího vyhodnocovanou součástí vzniká numerickou rekonstrukcí z řezů pod různými úhly 3D model pomocí snímku nasnímaných během otáčení součásti kolem jedné osy. Tato metoda je nicméně velice finančně nákladná.

Nevýhodou experimentu je nízký počet přesetí prášku k objektivnímu vyhodnocení jeho kvality i po několikanásobném prosetí. Pro konkrétnější objektivizaci výsledku by bylo vhodné v příštích výzkumech porovnat výsledky prášku po dvou přesetích s práškem po vícečetném přesetí. Z důvodu ekonomických a časových možností byl v experimentu použit pouze 1x a 2x přesetý prášek.

Na závěr je nutné vyzdvihnout fakt, že opakovaným recyklováním může dojít ke ztrátě kvality prášku v důsledku tvorby oxidů v mikrostruktuře související s absorpcí kyslíku. Tento děj může nepříznivě ovlivnit chemické, fyzikální či mechanické vlastnosti, ať už prášku samotného, tak především vytištěné součásti.

8 Výzkum porozity vytištěných součástí

V rámci experimentu zjišťování porozity bylo postupováno dle návrhu metody DOE, které se věnuje kapitola 6.4. Cílem výzkumu bylo zjistit, do jaké míry jednotlivé variace parametrů tisku ovlivní výslednou hustotu součásti v závislosti na použitém panenském, případně recyklovaném prášku. V tomto případě se jedná o výkon laseru a rychlost skenování. Nastavení procesních parametrů jdou k dispozici v kapitole 8.1. V průběhu tisku se nevyskytly žádné komplikace.



Obrázek 24 Tisk zkoumaných součástí pomoci tiskárny TruPrint 1000 od firmy TRUMPF

8.1 Procesní parametry

Největší vliv procesních parametrů se přiřazuje výkonu laseru, skenovací rychlosti a strategii, tloušťce vrstvy, šrafovací vzdálenosti a předehřevu stavební desky neboli substrátu. Variovanými parametry byly v tomto případě zvoleny výkon laseru a rychlost skenování. Tabulka 9 představuje nastavení parametru tisku pro jednotlivé vzorky kovového prášku. Pro tisk všech vzorků byla zvolena skenovací strategie šachovnice neboli „Chessboard“.

Tabulka 9 Nastavení procesních parametrů jednotlivých vzorků

| Vzorek | Výkon laseru | Rychlost skenování | Skenovací strategie |
|--------|--------------|--------------------|---------------------|
| č. | [W] | [mm/s] | Chessboard |
| 1 | 145 | 800 | |
| 2 | 175 | 800 | |
| 3 | 115 | 1000 | |
| 4 | 115 | 800 | |
| 5 | 145 | 1000 | |
| 6 | 175 | 1400 | |
| 7 | 175 | 1000 | |
| 8 | 115 | 1200 | |
| 9 | 85 | 800 | |
| 10 | 145 | 1400 | |
| 11 | 85 | 1200 | |
| 12 | 175 | 1200 | |
| 13 | 145 | 1200 | |
| 14 | 85 | 1000 | |
| 15 | 85 | 1400 | |
| 16 | 115 | 1400 | |

8.2 Výsledky měření porozity součástí

Pro určení výsledků měření porozity byl použit přístroj pyknometr AccuPyc 2 1340. Více informací o tomto přístroji je obsaženo v kapitole 6.2. Měření probíhalo ve spolupráci s Fakultou Materiálově-technologickou – VŠB – TUO.

V tabulkách číslo 10, 11 a 12 je možné shlédnout výsledky měření hustoty součástí za použití práškového materiálu po různém počtu přesetí. Procesní parametry pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tabulce číslo 9.

Tabulka 10 Měření hustoty součástí vytištěné panenským práškem včetně přepočtu na porozitu

| Vzorek | r – Pyknometrická hustota | Puz – Uzavřená pórovitost | D – Hustota |
|--------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| č. | [g/cm ³] | [%] | [%] |
| 1 | 2,664 | 0,564 | 99,435 |
| 2 | 2,627 | 1,954 | 98,045 |
| 3 | 2,657 | 0,830 | 99,169 |
| 4 | 2,669 | 0,391 | 99,608 |
| 5 | 2,666 | 0,489 | 99,510 |
| 6 | 2,672 | 0,289 | 99,710 |
| 7 | 2,665 | 0,534 | 99,465 |
| 8 | 2,651 | 1,054 | 98,945 |
| 9 | 2,599 | 2,992 | 97,007 |
| 10 | 2,669 | 0,387 | 99,612 |
| 11 | 2,667 | 0,466 | 99,533 |
| 12 | 2,668 | 0,440 | 99,559 |
| 13 | 2,677 | 0,095 | 99,904 |
| 14 | 2,653 | 0,979 | 99,020 |
| 15 | 2,670 | 0,364 | 99,635 |
| 16 | 2,595 | 3,156 | 96,843 |

Tabulka 11 Měření hustoty součástí vytištěné 1x přisetým práškem včetně přepočtu na porozitu

| Vzorek | r – Pyknometrická hustota | Puz – Uzavřená pórovitost | D – Hustota |
|--------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| č. | [g/cm ³] | [%] | [%] |
| 1 | 2,655 | 0,910 | 99,089 |
| 2 | 2,648 | 1,175 | 98,824 |
| 4 | 2,665 | 0,541 | 99,459 |
| 3 | 2,663 | 0,604 | 99,395 |
| 5 | 2,666 | 0,518 | 99,481 |
| 6 | 2,675 | 0,182 | 99,817 |
| 7 | 2,666 | 0,492 | 99,507 |
| 8 | 2,658 | 0,817 | 99,182 |
| 9 | 2,598 | 3,026 | 96,973 |
| 13 | 2,671 | 0,324 | 99,675 |
| 14 | 2,648 | 1,179 | 98,820 |
| 12 | 2,668 | 0,444 | 99,556 |
| 10 | 2,668 | 0,425 | 99,574 |
| 11 | 2,667 | 0,455 | 99,544 |
| 15 | 2,674 | 0,220 | 99,779 |
| 16 | 2,598 | 3,026 | 96,973 |

Tabulka 12 Měření hustoty součástí vytištěné 2x přeseťm práškem včetně přepočtu na porozitu

| Vzorek | r – Pyknometrická hustota | Puz – Uzavřená pórovitost | D – Hustota |
|--------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| č. | [g/cm ³] | [%] | [%] |
| 1 | 2,665 | 0,552 | 99,447 |
| 2 | 2,627 | 1,970 | 98,029 |
| 3 | 2,664 | 0,582 | 99,417 |
| 4 | 2,667 | 0,459 | 99,541 |
| 5 | 2,669 | 0,410 | 99,589 |
| 6 | 2,669 | 0,384 | 99,615 |
| 7 | 2,657 | 0,847 | 99,153 |
| 8 | 2,653 | 0,996 | 99,003 |
| 9 | 2,595 | 3,171 | 96,828 |
| 10 | 2,667 | 0,485 | 99,514 |
| 11 | 2,669 | 0,406 | 99,593 |
| 12 | 2,666 | 0,507 | 99,492 |
| 13 | 2,671 | 0,309 | 99,690 |
| 14 | 2,651 | 1,070 | 98,929 |
| 15 | 2,676 | 0,115 | 99,884 |
| 16 | 2,599 | 3,007 | 96,992 |

Výpočet uzavřené pórovitosti se vypočítá dle vzorce (3):

$$P_{uz} = \left(1 - \left(\frac{r}{\varrho}\right)\right) * 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

Kde r představuje pyknometrickou hustotu a ϱ je hodnota 100% hustoty zkoumaného materiálu v našem případě je to 2,68 g/cm³.

Výpočet hustoty součásti se vypočítá podle vzorce (4):

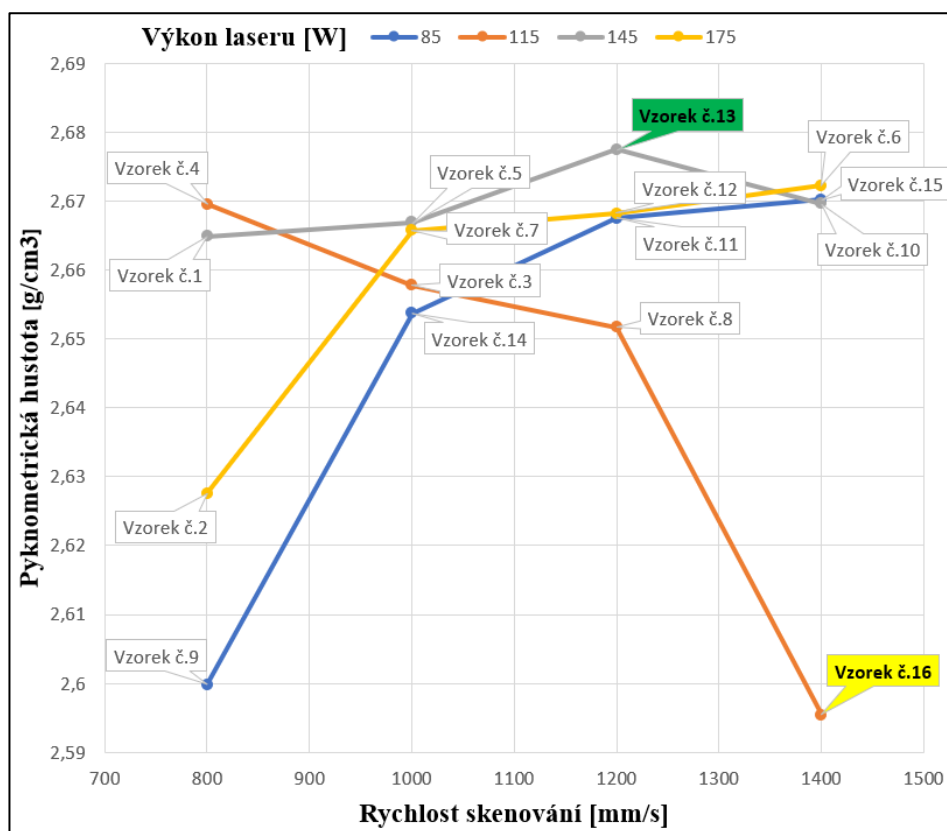
$$D = \frac{(r * 100)}{\varrho} \text{ [%]} \quad (4)$$

Kde r představuje pyknometrickou hustotu a ϱ je 100% hodnota hustoty zkoumaného materiálu.

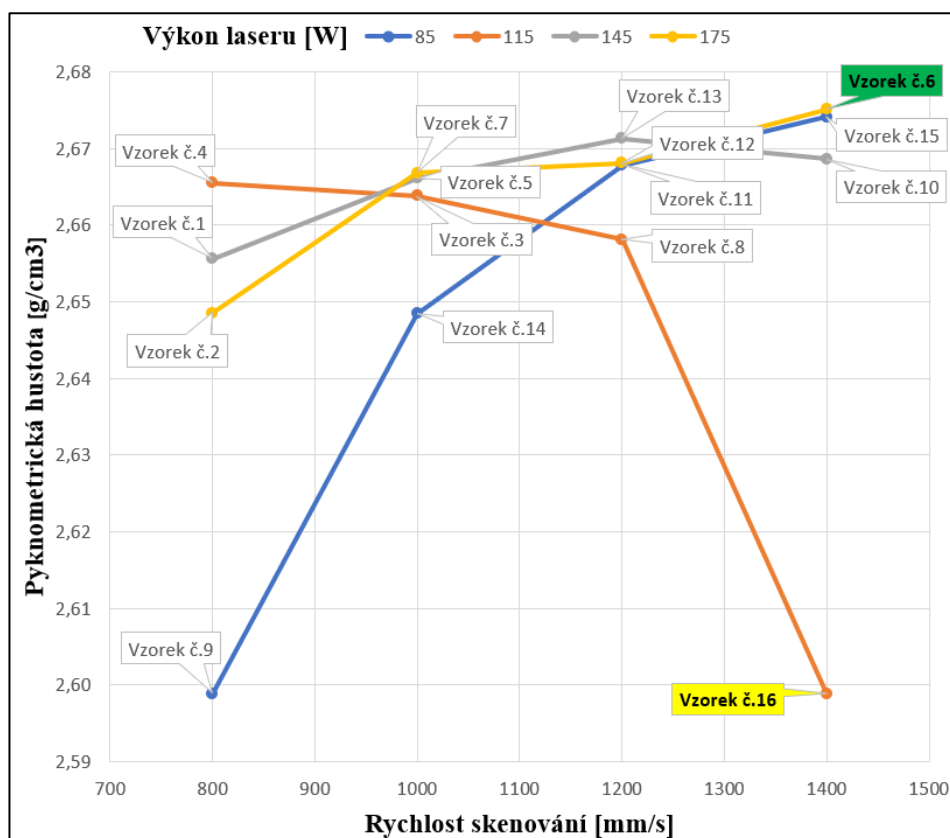


Obrázek 25 Oddělení vytištěných součástí od stavební desky pomocí pásové pily

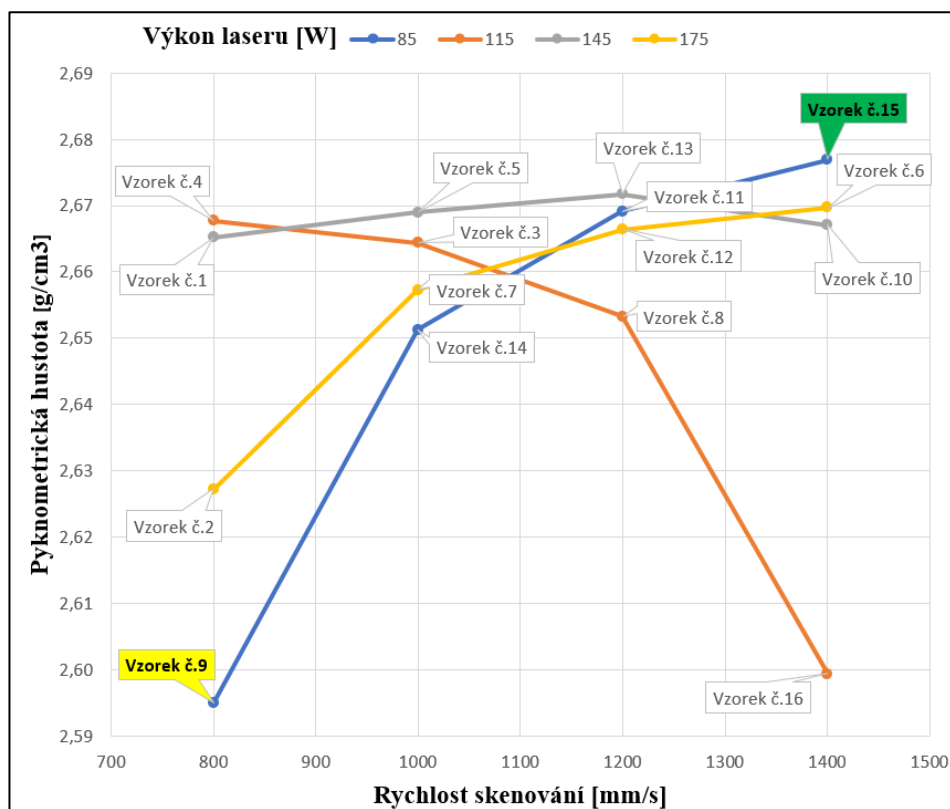
Grafy níže znázorňují výsledky hustoty všech vytištěných vzorků v závislosti na výkonu laseru, rychlosti skenování a použitého kovového prášku. Osa Y na obrázcích 26, 27, 28 zobrazuje velikost pyknometrické hustoty vytištěné součásti změřené pomocí přístroje AccuPyc 2 1340, osa X vyjadřuje rychlost skenování (800 mm/s, 1000 mm/s, 1200 mm/s, 1400 mm/s) zatímco barevně označené přímky na těchto obrázcích znázorňují nastavení výkonu laseru (85 W, 115 W, 145 W, 175 W). Z těchto grafů je jasné viditelné, že rychlost skenování nejvíce ovlivňuje výslednou porozitu součástí.



Obrázek 26 Graf znázorňující pyknometrickou hustotu součásti v závislosti na výkonu laseru a rychlosti skenování, použitým práškem v tom případě je panenský



Obrázek 27 Graf znázorňující pyknometrickou hustotu součásti v závislosti na výkonu laseru a rychlosti skenování, použitým práškem v tom případě je 1x přesetý prášek



Obrázek 28 Graf znázorňující pyknometrickou hustotu součásti v závislosti na výkonu laseru a rychlosti skenování, použitým práškem v tom případě je 2x přesetý prášek

8.3 Závěr a diskuze

Tato kapitola se zaměřuje na výzkum porozity součásti použitím tří druhů práškového materiálu, jmenovitě panenský, 1x přesetý a 2x přesetý kovový prášek. Odpadní prášek nebyl z kvalitativních důvodů použit. Měření bylo provedeno v důsledku zjištění, že přesívání prášku nemá významnější vliv na tvorbu porozity. Pro tisk jednotlivých součástí byly použity různé procesní parametry. Bylo zjištěno, že nejvíce ovlivňujícím faktorem porozity součásti je skenovací rychlost. Se zvyšující rychlostí skenování rovněž stoupá i hustota součásti.

Jak je možné vidět v tabulkách 10, 11, 12 a obrázcích 26, 27, 28, hustota součásti se zanedbatelně snižuje. Dle očekávání nejlepších výsledků dosáhly součásti vytištěné panenským materiálem. Největší hustotu vykazuje vzorek č. 13, kde byl použit panenský prášek s hustotou 99,904 %, výkonem laseru 145 W a skenovací rychlost 1200 mm/s. Naopak nejhorší výsledek byl naměřen u vzorku č. 9. Pro tisk tohoto vzorku byl použit 2x přesetý kovový prášek. Výsledná hustota vzorku činí 96,973 %. Výsledky se liší v případě použití výkonu laseru s nastavením 115 W. Další výzkum by se mohl zaměřit na zkoumání umístění tištěné součásti na stavební platformě, neboť existují hypotézy, že i tento jev by mohl ovlivnit výslednou hustotu součásti. Zvýšení hustoty může být docíleno dalším zpracováním součásti tzv. post procesingem.

Příkladem takové aplikace je technologie HIP, což je izostatické lisování za vysokých teplot, u které bylo potvrzeno snížení porozity. Základem této technologie je rovnoměrné neboli izostatické lisování při teplotách více než 1000 °C. Proces probíhá v peci naplněné inertním plynem, většinou argonem. Dostatečný čas, tlak a teplota zapříčiní změnu v mikrostruktuře a odstraní tak vnitřní porozitu. Další možností postprocesingu je tepelné zpracování metodou T6, u které se používá teplota 520–540 °C po dobu 3-6 hodin. Účelem této metody je zvýšit tvrdost, meze kluzu a meze pevnosti. [55,56]

Tabulka 13 Shrnutí parametrů ovlivňující porozitu součásti

| Vlastnosti prášku | Parametry procesu | |
|-----------------------------|---------------------|----------------------------|
| Tvar částic | Výkon laseru | Umístění stavby |
| Distribuce velikosti částic | Rychlost skenování | Ochranná atmosféra |
| Chemické složení | Rozteč šrafování | Teplota stavební platformy |
| Teplota tání | Tloušťka vrstvy | Poloměr laserového paprsku |
| Tepelná vodivost | Strategie skenování | Typ laseru |

9 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo ověřit vliv recyklace Al slitiny na výslednou porozitu součásti metodou Selective Laser Melting a analyzovat vhodnost recyklovaného kovového prášku AlSi10Mg pro opětovné použití v aditivní výrobě součásti.

Pomocí SEM byly charakterizovány tři typy prášků AlSi10Mg, jmenovitě panenský, 1x přesetý a 2x přesetý. Rozdíly mezi těmito prášky, co se průměrné velikosti částic, morfologie, složení a výsledné porozity součásti týče, byly natolik nepatrné, že není pochyb o možnostech dalšího použití recyklovaného prášku, aniž by to mělo nepříznivý vliv na kvalitu konečného produktu.

V úvodu práce se čtenáři seznámili s rozdělením aditivní výroby, principy fungování různých metod a zejména metodou selektivního laserového tavení. Kapitola zabývající se selektivním laserovým tavením popisuje výhody této metody, použití a strategie. Následně byl proveden rozbor problematiky výroby, ve kterém byly objasněny účinky vstupních procesních parametrů na způsob vzniku jednotlivých nežádoucích jevů. Závěr teoretické části byl věnován kovovým práškům. V této kapitole je možné zjistit, jak způsob výroby kovových prášků ovlivňuje tvar a velikost částic prášku, případně jaký vliv má recyklace na vlastnosti materiálu a prášku samotného. Poslední řešeršní část se zabývá hliníkovými slitinami.

Úvod praktické části patří představení profesionálních zařízení, které byly použity během výzkumu. Obsahuje stručný popis těchto zařízení včetně principu fungování a základních technických vlastností a parametrů. Výzkum pokračoval studií práškové slitiny AlSi10Mg, zejména popisem morfologie za použití elektronového mikroskopu a spektrální analýzy, měřením distribuce a velikosti částic pomocí stroje Mastersizer 3000.

Závěrečná část se věnovala výzkumem porozity vytištěných součástí použitím tří druhů kovového prášku při odlišných nastavení procesních parametrů. Jak již bylo na začátku závěru zmíněno, rozdíly mezi konečnými výsledky byly natolik zanedbatelné, že o možnostech znovu použití recyklovaného prášku není pochyb.

Poděkování

Hlavní poděkování patří vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jiřímu Hajnyšovi, Ph.D., kterému bych tímto rád poděkoval za odborné vedení, inspiraci a čas, který mi věnoval. Děkuji za cenné rady, praktickou pomoc v oblasti experimentálního výzkumu a za trpělivost, kterou mi během konzultací projevil. V neposlední řadě mé poděkování patří také fakultě FMMI za spolupráci při měření vzorků použitých v této diplomové práci.

10 Seznam použité literatury

1. ABOULKHAIR, Nesma, Nicola EVERIT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting 2014, 77-86.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860414000062>
2. About Additive Manufacturing. Loughborough University. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>
3. AccuPyc II 1345. *Micromeritics*. 2017. Dostupné z: <https://www.micromeritics.com/product-showcase/AccuPyc-II-1340.aspx>
4. Aluminium (AlSi10Mg). *ZARE*. 2014. Dostupné z: <https://www.zare.it/en/materials/aluminium-alsi10mg>
5. BYRTUS, R. *Obsluha 3D tiskárny Renishaw AM400 pro 3D tisk metodou SLM*: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017. Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.
6. CASALINO, G., S.L. CAMPANELLI a N. CONTUZZI. Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. *Optics and Laser Technology*. 2015, 151-158. ISSN 0030-3992. Dostupné z: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-7c089ec0-d300-3346-bb09-c1e0ed0fff62>
7. Compact and robust 3D printing. *TRUMPF*. 2019. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Machines_and_Systems/02_Brochures/TRUMPF-TruPrint1000-flyer-EN.pdf
8. Company profile. *TRUMPF*. 2020. Dostupné z: https://www.trumpf.com/en_GB/company/trumpf-group/company-profile/
9. DEEV, A. A., KUZNETCOV, P. A., PETROV, S.N. Anisotropy of Mechanical Properties and its Correlation with the Structure of the Stainless Steel 316L Produced by the SLM Method. *Physics Procedia*. 2016, 789-796, ISSN 1875-3892
10. EOS Aluminium AlSi10Mg: Material data sheet. *EOS*, 2014. Dostupné z: https://cdn0.scrvt.com/eos/public/8837de942d78d3b3/4e099c3a857fdddca4be9d59fbb1cd74/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf
11. FORD, Sharon L. N. Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness. *Journal of International Commerce & Economics*. 2014, 6(40). Dostupné z: https://usitc.gov/publications/332/journals/vol_vi_article4_additive_manufacturing_technology.pdf
12. GONG, Haijun, H. Khalid RAFI, Hengfeng GU a Thomass STARR. Analysis of Defect Generation in Ti-6Al-4 V Parts Made using Powder Bed Fusion Additive

- Manufacturing Processes. 2014, 87–98. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/264979977_Analysis_of_Defect_Generation_in_Ti-6Al-4_V_Parts_Made_using_Powder_Bed_Fusion_Additive_Manufacturing_Processes
13. HASTIE, James C., Mehmet E. KARTAL a Luke N. CARTEL. Classifying shape of internal pores within AlSi10Mg alloy manufactured by laser powder bed fusion using 3D X-ray micro computed tomography: Influence of processing parameters and heat treatment. *Materials characterization*. Elsevier, 2020, 163. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580319329717#fo0015>
14. Industrial applications of Renishaw metal additive manufacturing technology. *Renishaw*. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/prumyslove-aplikace-renishaw-technologie-aditivni-vyroby-z-kovu--15256>
15. ISO/ASTM 52900. Additive manufacturing - General principles - Terminology. 2015.
16. JAKEŠ, Jakub. *Aditivní technologie výroby*. Ostrava, 2016. Bakalářská práce. VŠB Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie.
17. LI, Ruidi, Jinhui LIU a Yusheng SHI. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. 2011, 59, 1025–1035. Dostupné z:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-011-3566-1>
18. MANFREDI, Diego, Flaviana CALIGNANO, Manickavasagam KRISHNAN a Riccardo CANALI. Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs). *Research gate*. 2014. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/263964252_Additive_Manufacturing_of_Al_Alloys_and_Aluminium_Matrix_Composites_AMCs#pf8
19. Mastersizer 3000. *Malvernpanalytical*. Dostupné z:
https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000?creative=311633610439&keyword=malvern%20mastersizer%203000&matchtype=e&network=g&device=c&gclid=CjwKCAjw7-P1BRA2EiwAXoPWA-4t_30k32EnBR03LYOMH-ST05FrJIVBMHtG9KTC0BAMbNsc-UxhbxoCOZQQA vD_BwE
20. Metal powder for your industrial additive manufacturing. *TRUMPF*. 2019. Dostupné z:
https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Products/Machines_and_Systems/02_Brochures/TRUMPF-additive-manufacturing-systems-TruServices-materials-Flyer-EN.pdf
21. Metal powders supply. *Renishaw*. 2016. Dostupné z:
<http://www.renishaw.com/en/metal-powders-supply--31458>
22. Metal powders for AM. *Renishaw*. 2016. Dostupné z:
<http://www.renishaw.cz/cs/metal-powders-for-am--31457>

23. MOLITCH-HOU, Michael. 7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing. *Engineering.com*. 2017. Dostupné z: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15202/7-Issues-to-Look-Out-for-in-Metal-3D-Printing.aspx>
24. Laser Metal Fusion for complex, metallic components. TRUMPF. 2020. Dostupné z: https://www.trumpf.com/en_GB/products/machines-systems/additive-production-systems/truprint-1000/
25. Práškové kovy pro aditivní výrobu. *Renishaw*. 2019. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/praskove-kovy-pro-aditivni-vyrobu--31457>
26. SHRESTHA, Subin, Thomass STARR a Kevin CHOU. A Study of Keyhole Porosity in Selective Laser Melting: Single-Track Scanning With Micro-CT Analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2019, 141(7). Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/332658085_A_Study_of_Keyhole_Porosity_in_Selective_Laser_Melting_Single-Track_Scanning_With_Micro-CT_Analysis
27. SHISHKOVSKY, Igor. New Trends in 3D Printing. BoD – Books on Demand, 2016. ISBN 9789535124795.
28. The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing. *3Dnatives*. 2019. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
29. The Free Beginner's Guide. *3D Printing Industry* 2017. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#05-materials>
30. VAROTSIS, Alkaïos Bournias. Characteristics of Binder Jetting Printer Parameters. In: 3D HUBS. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/#work>
31. VAROTSIS, Alkaïos Bournias. Introduction to SLS 3D printing. In: 3D HUBS. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/>
32. YADROITSEV, Igor a A. V. GUSAROV. Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, 210(12), 1624-163. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013610001469>
33. YAP, C. Y., et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*. 2015, 2, 1 – 22. ISSN 19319401
34. Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM). *Konstrukter*. Vydavatelství Nová média, 2016. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
35. 3D PRINTING - ADDITIVE: Photopolymerization - VAT, SLA, DLP, CDLP. *3D EXPERIENCE*. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/photopolymerization>

36. 3D PRINTING - ADDITIVE: Powder bed fusion - DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM. *3D EXPERIENCE*. 2018. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion>
37. 3D PRINTING - ADDITIVE: Sheet lamination - LOM, SL. *3D EXPERIENCE*. 2018. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/sheet-lamination>
38. 5 Common Problems Faced with Metal 3D printing – And How You Can Fix Them. *AMFG*. 2018. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/05/01/5-problems-faced-when-3d-printing-metals-and-how-to-fix-them/?cn-reloaded=1>
39. Design for metal AM - a beginner's guide. 2017. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/design-for-metal-am-a-beginners-guide--42652>
40. Recycling metal AM powder – a Titanium recycling study. *3dfabprint*. 2017. Dostupné z: <https://3dfabprint.com/recycling-metal-am-powder-a-titanium-recycling-study/>
41. ARDILA, L. C., F. GARCIANDIA a J.B. GONZÁLEZ-DÍAZ. Effect of IN718 recycled powder reuse on properties of parts manufactured by means of Selective Laser Melting. *Physics Procedia*. 2014, 56, 99-107. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389214002971>
42. VITÁSEK, L. *Mechanické vlastnosti Al slitiny připravené pomocí procesu SLM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 77 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Libor Pantělejev, Ph.D.
43. BARTKOWIAK, Konrad, Sven ULLRICH, Thomas FRICK a Michael SCHMICH. New Developments of Laser Processing Aluminium Alloys via Additive Manufacturing Technique. *Physics Procedia*. 2011, 12, 393-401. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001295>
44. MARTIN, John H., Brennan D. JAHATA a Jacob M. HUNDLEY. 3D printing of high-strength aluminium alloys. *Nature*. 2017, 549, 365–369. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/nature23894#citeas>
45. ASGARI, Hamed, Carter BAXTER, Keyvan HOSSEINKHANI a Mohsen MOHAMMADI. On microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg_200C using recycled powder. *Materials Science & Engineering A*. 2017, 707, 148-158. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509317311991>
46. WANG, Lin-zhi, Sen WANG a Jiao-jiao WU. Experimental investigation on densification behavior and surface roughness of AlSi10Mg powders produced by selective laser meltin. *Optics & Laser Technology*. 2017, 96, 88-96. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030399217301524>
47. CAI, Xingfang, Andrew Alexander MALCOLM, Brian Stephen WONG a Zheng FAN. Measurement and characterization of porosity in aluminium selective laser melting parts using X-ray CT. *Virtual and Physical Prototyping*. 2015, 10, 195-206. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17452759.2015.1112412>

48. OLAKANMI, E.O. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: Effect of processing conditions and powder properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, 213(8), 1387-1405. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401361300099X>
49. READ, Noriko, Wei WANG, Khamis ESSA a Moataz M. ATTALLAH. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials & Design*. 2015, 65, 417-424. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306914007468>
50. TRADOWSKY, U., J. WHITE a R.M. WARD. Selective laser melting of AlSi10Mg: Influence of post-processing on the microstructural and tensile properties development. *Materials & Design*. 2016, 105, 212-222. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127516306712>
51. LARROSA, N.O., W. WANG a N. READ. Linking microstructure and processing defects to mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg alloy. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2018, 98, 123-133. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167844218303173>
52. THIJS, Lore, Karolien KEMPEN, Jean-Pierre KRUTH a Jan Van HUMBEECK. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia*. 2013, 61(5), 1809-1819. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645412008592>
53. MARKUSSON, Lisa. *Powder Characterization for Additive Manufacturing Processes*. 2017. Degree project. Luleå University of Technology. Dostupné také z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1084670/FULLTEXT01.pdf>.
54. SUNDARARAJAN, K. Design of experiments – a primer. *Isixsigma*. Dostupné z: <https://www.isixsigma.com/tools-templates/design-of-experiments-doe/design-experiments-%E2%90%93-primer/>
55. SCHNELLER, Wolfgang, Martin LEITNER a Sebastian SPRINGER. Effect of HIP Treatment on Microstructure and Fatigue Strength of Selectively Laser Melted AlSi10Mg. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019, 3(1). Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2504-4494/3/1/16/htm>
56. LATHABAI, Sri. Additive Manufacturing of Aluminium-Based Alloys and Composites. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. 2018, 47-92. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081020630000023#bb0320>

11 Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 Vytisknuté kovové součásti 3D tiskárnou Renishaw AM400 použitím metody SLM [5]..... | 13 |
| Obrázek 2 Schéma 3D tiskárny využívající metodu Tryskání pojiva [30] | 15 |
| Obrázek 3 Schéma tiskárny využívající metodu Vytlačování materiálu [31] | 16 |
| Obrázek 4 Schéma tiskárny využívající modelu Fúze práškového lože [31]..... | 17 |
| Obrázek 5 Rozdělení 3D tisku [30] | 18 |
| Obrázek 6 Princip metody SLM [5] | 20 |
| Obrázek 7 Schéma pracovní komory 3D tiskárny Renishaw AM [5]..... | 21 |
| Obrázek 8 Výsledky mechanických testů, vlastnosti a drsnosti povrchů v závislosti na relativní hustotě [6] | 24 |
| Obrázek 9 Horní vrstva, spodní vrstva a jádrové oblasti [18] | 27 |
| Obrázek 10 Nejčastěji používané strategie skenování práškového materiálu [39] | 27 |
| Obrázek 11 Základní ilustrace procesu atomizace plynu [53] | 30 |
| Obrázek 12 Ukázka naklápacího kelímku (1a) a spodního nalévacího kelímku (2a) použitého pro vakuovou indukční tavicí pec, včetně Ilustrace indukční cívky použité pro elektrodovou indukční tavicí pec (1b) [53]..... | 31 |
| Obrázek 13 Fotky při nízkém a vysokém přiblížení prášků AlSi10Mg_200C. (a) a (d): Panenský prášek; (b) a (e): Odpařený kovový prášek; (c) a (f): Recyklovány. [45] | 34 |
| Obrázek 14 Práškové kompozice IN 718 pro (a) první a (b) poslední iteraci [1] | 35 |
| Obrázek 15 3D tiskárna TruPrint 1000 | 40 |
| Obrázek 16 Pyknometr AccuPyc II 1340 [3] | 41 |
| Obrázek 17 Mastersizer 3000 [19] | 43 |
| Obrázek 18 Příklad 1,5kg balení kovového prášku od firmy TRUMPF | 46 |
| Obrázek 19 Snímek panenského kovového prášku AlSi10Mg, zvětšení 200 x | 49 |
| Obrázek 20 Označení satelitů, zvětšení 2000 x | 50 |
| Obrázek 21 Poškozená částice prášku, zvětšení 500 x | 50 |
| Obrázek 22 Prosevací stanice od firmy Renishaw, včetně náhledu dovnitř přístroje [5]..... | 51 |
| Obrázek 23 Srovnání velikosti částic kovového prášku | 52 |
| Obrázek 24 Tisk zkoumaných součástí pomocí tiskárny TruPrint 1000 od firmy TRUMPF | 54 |
| Obrázek 25 Oddělení vytisknutých součástí od stavební desky pomocí pásové pily..... | 58 |
| Obrázek 26 Graf znázorňující pyknometrickou hustotu součástí v závislosti na výkonu laseru a rychlosti skenování, použitým práškem v tom případě je panenský..... | 59 |
| Obrázek 27 Graf znázorňující pyknometrickou hustotu součástí v závislosti na výkonu laseru a rychlosti skenování, použitým práškem v tom případě je 1x přesetý prášek..... | 60 |
| Obrázek 28 Graf znázorňující pyknometrickou hustotu součástí v závislosti na výkonu laseru a rychlosti skenování, použitým práškem v tom případě je 2x přesetý prášek..... | 60 |

12 Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 Porovnání hustot a hustoty laserové energie ve slitinách AlSi10Mg / Al-Si zpracovaných pomocí různých parametrů a skenovacích strategií. [13] | 23 |
| Tabulka 2 Průměrná velikost částic prášků AlSi10Mg 200C [45] | 34 |
| Tabulka 3 Technické údaje 3D tiskárny TruPrint 1000 [24] | 38 |
| Tabulka 4 Technické údaje přístroje Mastersizer 3000 [19] | 44 |
| Tabulka 5 Počet experimentu v závislosti na počtu úrovní a faktorů | 45 |
| Tabulka 6 Chemické složení slitiny AlSi10Mg [4] | 47 |
| Tabulka 7 Spektrální analýza kovového prášku AlSi10Mg měřená v jednotlivých fázích výzkumu pomocí přístroje Mastersizer 3000 | 48 |
| Tabulka 8 Měření distribuce a velikosti částic pomocí přístroje Mastersizer 3000 | 52 |
| Tabulka 9 Nastavení procesních parametrů jednotlivých vzorků | 55 |
| Tabulka 10 Měření hustoty součástí vytištěné panenským práškem včetně přepočtu na porozitu | 56 |
| Tabulka 11 Měření hustoty součástí vytištěné 1x přisetým práškem včetně přepočtu na porozitu | 56 |
| Tabulka 12 Měření hustoty součástí vytištěné 2x přisetým práškem včetně přepočtu na porozitu | 57 |
| Tabulka 13 Shrnutí parametrů ovlivňující porozitu součástí | 61 |